

摘 要

由于配电网中装设了大量的电容器进行无功优化来降低网损，但在谐波频率下，容易产生系统与电容器之间的谐波谐振或谐波放大，从而使系统的谐波畸变率变大，破坏了系统的安全运行。针对这一问题，本文提出了谐波畸变情况下对电网进行无功优化规划的模型，给出了用遗传算法进行求解的具体步骤并通过灵敏度方法对遗传算法进行了改进。结果表明：所提出的模型使得电网在满足电压和谐波标准约束的情况下，经济性能得到优化，同时改进后的遗传算法大大加快了遗传过程的进化速度，说明了改进方法的有效性。

本文以胜利油田孤岛采油厂孤四管理区配电网为研究背景，以孤岛油田配电网络实际运行情况为基础，结合配网自动化管理系统软件的研制，采用 Visual Basic 语言开发无功优化软件模块。通过在孤四区配电网的实际应用，证明该无功优化模块具有一定的实用性。

关键词：配电网，无功优化，遗传算法，谐波，灵敏度

ABSTRACT

In the distribution system, many capacitor banks are applied to decrease the loss of the network. The harmonic resonance may be incurred between the network and the capacitor banks in the harmonic frequency, thus the security of the system may be destroyed because of the high harmonic distortion level. To handle this problem, the Mathematical model of distribution optimal operation was set up in the paper. A specific method named genetic algorithm, which was refined by the sensitivity methods applied in the model. In short, the system power loss and harmonic distortion are minimized, while being satisfied the voltage amplitude constraints and harmonic constraints, and the economical effect is better. The results proved the effectiveness of the refined method and the speed of the Genetic Algorithm increased greatly.

This article take Gusi Administrative District Distribution network of Shengli oil field Gudao extraction factory as the research background, take the oil field power distribution network actual movement situation as foundation, ties the development of network system automation management system software, uses Visual Basic developed var optimization software module. Through in the Gusi area distribution network practical application, proved the var optimization module has certain usability.

KEY WORDS: distribution network, var optimization, genetic algorithms,
harmonic, sensitivity method

第一章 绪论

1.1 课题的提出

近几年来,油田地面生产系统围绕供电系统开展节能降耗工作,以节电为重点进行节能改造,油气地面工程技术水平取得了进步,在某些方面达到和接近国际先进水平,但整体上我国油气地面工程技术水平与国外相比有较大差距,与国内的领先水平相比也有一定距离,表现在能耗高、用人多,国内技术水平比较先进的油田,其吨油生产总能耗也是国外类似油田的1.8倍。

胜利油田有限公司孤岛采油厂孤四管理区管辖孤岛油田中部8套开发层系,1971年开始开发,是年产量近百万吨的老油区,属于稠油油田,原油密度为 0.967 , 50°C 原油粘度为 $978.2\text{mPa}\cdot\text{s}$,1973年开始产油,目前已进入特高含水开发阶段,综合含水已高达91%。近年来,孤四生产管理区根据各个区块的油藏地质特性和油品性质的不同,分别采用了注聚开发、注水开发和注蒸汽开发等多种采油工艺,稠油热采和注聚开采量已占到总采出量的75%以上。开采方式的变化和采出液含水的上升,造成了原油开采的高能耗、高成本。

2001年初该区有油井414口,开井367口,年产量 $96.4\times 10^4\text{t}$,日产液量 27614.1t ,日产油量 2641.24t ,综合含水90.44%,平均单井吨液耗能 $3.1\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$,年耗电 $3125\times 10^4\text{kW}\cdot\text{h}$;注水系统现有孤三注、孤七注两座注水站,管辖配水间34座(包括注聚站)、注水支干线24km,246口注水(注聚)井,开井210口,日注水量(含注聚)约 $27000\text{m}^3/\text{d}$,注水单耗 $6.23\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,年耗电 $6139.7\times 10^4\text{kW}\cdot\text{h}$;集输系统是以孤四联为中心的集输管理模式,共有联合站1座,中转站4座,计量站35座,拥有集输管网35.01km,集输系统冬季集输吨油耗气 $8.86\text{Nm}^3/\text{t}$,年平均集输吨油耗气 $8.5\text{Nm}^3/\text{t}$,年消耗燃气 $819.4\times 10^4\text{m}^3$,集输吨油耗电量 $4.7\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$,年耗电 $453.1\times 10^4\text{kW}\cdot\text{h}$;注汽系统2001年注入蒸汽84375t(8个月、平均 $14.65\text{t}/\text{h}$),吨汽耗油 $64\text{kg}/\text{t}$,吨汽耗电 $15.18\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$,年耗燃油5400t,年耗电 $128.7\times 10^4\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

孤四区生产吨油总能耗910.28MJ,其中机采系统、注水、集输、供热、供电系统的能耗分别占总能耗的12.8%、25.2%、27.1%、26.4%、4.4%,其他能耗占4.1%;生产吨油耗电 $123.76\text{kW}\cdot\text{h}$,其中机采系统、注水、集输、供热、供电系统的能耗分别占总电能消耗的26.2%、51.9%、3.8%、1.1%、9.1%。

分析地面工程技术现状,找出节能降耗的空间,有针对性的采取相应措施,才能达到降低成本的目的。孤四区供电系统的详细现状、存在问题概括如下:

孤岛采油厂孤四生产管理区内 6kV 线路共 18 条,共计 81.5 公里,10/0.4kV 配电变压器 143 台,总容量 30105kVA。

表 1-1 孤四生产管理区主要耗能设备统计表

项目	主要设备		辅助设备		合计	
	数量 (台)	装机容量 (kW)	数量 (台)	装机容量 (kW)	数量 (台)	装机容量 (kW)
油井电机	316	9113			316	9113
注水泵机组	9	16400	28	308	37	16708
联合站	21	1660	22	150	43	1750
注聚站	123	2196	21	404	143	2600
注汽站	2	300	17	93	20	393
合计	471	29669	88	955	559	30564

由上表可以看出,孤四区各类设备数量和装机容量较大,除去停用和备用设备后,实际运行的设备容量约为装机容量的 70%,但其耗电量仍然是相当惊人的,2001 年全年生产生活用电量为 $108065.5 \times 10^4 \text{kW} \cdot \text{h}$, 预计年用电递增量为 3%, 配电系统网损为 10% 左右。孤四区配电系统主要存在以下问题:

(1) 电网结构不合理,网损大,故障处理能力弱。由于油田生产的特殊性,油田初期滚动开发的特点,供配电网络边建设边生产,井口位置分散,整个管理区配电网络结构复杂、结构不尽合理,电网损失较大,平均网损 10%。受自动化条件的限制,不能够进行电网优化运行,管理水平落后,电网故障反映时间长,故障处理和恢复供电能力弱。

(2) 变压器陈旧、损耗高。供配电系统中大量使用着 S7 型变压器,损耗高,平均负荷率低,由于使用时间较长,变压器老化严重,存在渗漏油的情况,事故发生率高。

(3) 配电系统功率因数较低、无功损耗大。由于用电设备负载率及变压器负荷率均较低,造成整个供配电系统功率因数较低,无功损较大。

(4) 电机无功损耗严重、工作效率较低。井口及泵站内大部分电机均为 Y 系列电机,启动转矩小,负载率及效率较低,平均负载率约 25%,功率因数 0.62。

根据以上分析可以看出,网络损耗大、系统功率因数较低是孤四区配电系统存在的主要问题。因此降低网损、提高电力系统输电效率和电力系统运行的经济性是供电部门面临的实际问题,也是电力系统研究的主要方向之一。特别是随着电力市场的实行,供电公司通过有效的手段,降低网损,提高系统运行的经济性,可给供电公司带来更高的

效益和利润。配电网无功功率优化和无功功率补偿是电力系统安全经济运行研究的一个重要组成部分,通过对配电网无功电源的合理配置和对无功负荷的最佳补偿,不仅可以维持电压水平和提高电力系统运行的稳定性,而且可以降低有功网损和无功网损,使电力系统能够安全经济运行。

另外,近年来油田日益广泛地采用高技术、高效益的交直流传动系统,驱动装置逐步由恒速的交流电动机传动改为可调速的电气传动系统,使得油田配电系统中电力半导体装置日益增多。同时,油田配电系统中大量的电焊机、抽油机配电变压器等非线性负载都会在电网中产生无功和不同频率与幅值的高次谐波,其中以电力半导体装置所产生的高次谐波最为严重,约占总谐波发生源的70%以上。检测分析研究均证明,谐波会对大量的用电设备和系统设备产生严重危害。注入电网的过大谐波电流,对电网中作为无功补偿主要手段的电容器影响很大,不能使其发挥对基波无功补偿最优的作用,还会通过较正常数值更大的谐波电流^[2]。已有研究指出,对矿物油浸润绝缘的电容器,在电压总畸变率为5%的条件下运行二年,介损系数将提高到原来的二倍。特别是电容器的容抗随谐波频率升高而下降,一旦电容器容量配置不当,易放大谐波电流和产生谐振使电容器组受到损坏^[2]。

据统计,大约有70%的谐波故障是发生在电容器组上。针对电力系统受到谐波污染日趋严重的现状,寻求电力系统的无功优化补偿理论和实用技术,优化无功补偿,使其受谐波影响最小,对保证电力系统的安全经济运行,具有十分重要的现实意义。而作为无功补偿主要手段的电容器,在电力系统受到谐波污染时如何合理投运及安全运行,已成为系统统计和调度管理工作中日益关注的技术问题,也是电网调度自动化系统的一个重要的研究课题^[3]。

1.2 无功优化的国内外研究现状

本课题主要由两部分组成,基波无功优化规划为基础,然后是主要部分考虑谐波因素的无功优化规划。基波的无功优化相对来说是发展比较成熟的。下面详细介绍一下这两方面的发展现状。

1.2.1 基波无功优化的情况

配电网无功优化也称为配电网最优无功调度,它可表述为在满足配电网潮流约束和电压约束的前提下,调节可调变压器分接头和可投切电容器,以达到改善配电网中各节

点的电压水平和减少配电网网损的目的。由于配电网各种网络参数或控制变量有着自身的特点,如网络结构呈树状、支路 R/X 较大、一般为单电源供电等,所以配电网的无功优化有其独特的方法。配电网的无功优化问题是一个动态、多目标、多约束、不确定性的非线性整数规划问题,其控制变量为离散变量(补偿电容器组的投切组数),通过确定网络中新增无功补偿设备的容量及安装地点,以保证配电网正常及事故运行方式下的电压质量及稳定性,并使规划期内投资及运行费用的总和为最小。

长期以来,国内外的许多专家、学者都对此进行了大量的研究和探索工作,根据简化措施的不同,提出了很多方法。自 20 世纪 60 年代开始,运筹学及其分支逐渐应用于电力系统的无功优化计算中,产生了一系列的常规优化算法。这些算法都是建立在精确的数学模型和明确的约束条件之上的,通常是从某个初始点出发,按照一定的轨迹不断改进当前解,直到收敛于最优解。下面主要介绍几种常用的算法。

(1) 非线性规划法 (Nolinear Planning-NLP) [7-9]

配电网无功优化的非线性数学模型的目标函数为网络的有功损耗最小。

$$F = \text{MIN}[\Delta P(V_i, Q_{ci})] \quad (1-1)$$

约束条件:

$$V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \quad (\text{网络各节点电压})$$

$$Q_{ci\min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci\max} \quad (\text{网络各补偿节点的无功投切容量})$$

$$\Delta Q_i = 0 \quad (\text{除 PV 节点外的全部节点的无功平衡方程})$$

控制变量: $[Q_{ci}]$

状态变量: $[V_i]$

式中:

V_i — 除变电站节点以外其余节点的电压

Q_{ci} — 补偿节点电容器的无功投切容量

非线性规划法源于无功优化问题本身的非线性特征,其数学模型简单,通过调整梯度方向实现对非线性函数的处理,计算精度较高。但由于求解过程中有大量的求导、求逆运算,占用计算机内存较多,计算速度慢,收敛性差,易于陷入局部最优解,存在“维数灾”缺陷,而且不可以有效处理离散变量和不等式约束。非线性规划法虽然是最早应

用于实践的优化算法,但是由于存在上述缺陷,使其只能作为辅助算法进行局部优化计算。目前用的比较多的主要有简化梯度法、牛顿法、共轭梯度法和二次规划法。简化梯度法具有一阶收敛速度,对初始条件依赖性大,在向最优点逼近时极易出现“锯齿”现象。牛顿法具有二阶收敛速度,充分利用矩阵的稀疏性简化计算,但在求解海森逆矩阵时浪费了大量时间,计算结果不精确。共轭梯度法可以有效避免“锯齿”现象和求解逆矩阵,但只在目标函数二次性较强的区域收敛速度快。二次规划法主要针对目标函数为二次函数时,收敛速度比较理解,计算精度较高,可以直接处理各种约束。

(2) 线性规划法 (Linear Planning-LP) ^[4-6]

配电网无功优化的线性数学模型的目标函数为网络的有功损耗最小。

$$F = \text{MIN}[\Delta P(V_i, Q_i)] \quad (1-2)$$

约束条件:

$$\Delta V_i \approx \sum_{j=1}^N X_{ij} \Delta Q_j$$

$$0 \leq \Delta Q_i$$

式中:

ΔV_i 一节点 i 的实际电压与允许电压的差值, 即节点 i 电压改变量;

X_{ij} 一阻抗矩阵元素;

N 一网络节点总数;

线性规划法是发展最为成熟的一种方法, 直接对变量和约束条件设定限制, 利用泰勒展开, 使非线性问题在初值点附近转化为线性问题求解, 收敛可靠, 计算速度快, 能够满足实时调度对计算速度的要求, 但不能有效处理离散变量问题, 由于需要多次潮流计算, 使优化精度差, 效率不高, 存在“维数灾”问题。线性规划法的最典型代表就是灵敏度分析法和内点法。灵敏度分析法以灵敏度关系为基础, 采用对偶线性规划法求解。由于要对高阶雅可比矩阵求逆, 因此, 计算工作量大, 耗费计算时间和内存, 引入的简化假定也影响了计算精度和收敛速度。内点法计算速度快, 精度高, 具有很好的鲁棒性和收敛特性, 但是如何探测和处理优化过程中的不可行解是一个难题, 为了解决这一问题, 产生了内点法的诸多变形, 如仿射尺度法、路径跟随法、原-对偶内点法和二次内点法等。后续出现的有求灵敏度矩阵的控制变量“摄动法”、单纯形法和其对偶单纯形法, 由于收敛性差, 应用不多。

(3) 动态规划法^[7-8]

动态规划是数学规划的一个分支,是研究多阶段决策过程最优解的有效方法,因其能够处理非线性问题,并反映优化过程而被引入无功优化领域,产生了无功优化的动态规划法。该方法从动态过程的总体进行寻优,按时间或空间顺序将问题分解为若干互相联系的阶段进行求解,每个阶段包含一个变量,依次对每一阶段做出决策,最后获得整个过程的最优解。动态规划法可以有效地处理多变量方程和离散性问题,通过引入“时段”概念把非线性问题转化为多阶段决策问题进行最优化求解,对目标函数和约束条件无限制,收敛性好。但是该方法建模复杂,计算速度慢,存在“维数灾”问题,不易在工程上实现。近年来的改进措施主要在寻找更理想的降维方法及其他混合控制的方法,并取得了一定成效。

(4) 混合整数规划法

为了更精确地处理离散变量问题,诞生了混合整数规划法^[10]。此类算法先对离散变量归整为整数变量,再与线性规划法协调处理连续变量,分两步优化,提高计算精度。但是这种方法存在优化过程过于复杂、计算量大、收敛慢、易发生振荡、发散的缺点,削弱了总体最优性。混合整数规划法中比较有代表性的是凑整数法、割平面法、分支定界法和拉格朗日松弛方法。凑整数法只应用于低维数小规模的纯整数线性规划问题。割平面法由于内嵌单纯形法而收敛速度慢,仅用于小型纯整数规划。分支定界法适用于大型的混合整数规划,通过将原问题分解为几个部分来缩小可行域,加快收敛速度。拉格朗日松弛法也适合应用于大系统,但是存在对偶间隙误差,影响计算精度。

(5) 模拟进化法

自然界生物的进化过程既不受人为控制,也不受人为因素的干扰,具有很多优点可以借鉴。因此人们基于达尔文的进化论及孟德尔和德尔根的遗传学说创立了模拟进化法,求解复杂的无功优化问题。模拟进化法属于一类高效随机优化法,强调自适应性,可以有效解决多参数优化问题。对优化问题无可微和连续的要求,具有全局收敛性、并行处理特性、通用性及强鲁棒性等优点,可以处理非平滑、非连续、不可导函数的优化问题。该算法从初始点群出发,利用概率转移规则引导搜索,可以在复杂和不确定的区域找到全局最优解。但计算效率较低,对初值有依赖性。

遗传算法^[9-11]基于适者生存的进化理论,通过模拟生物体的遗传过程进行优化计算。首先将优化问题编码为染色体,将目标函数转化为染色体的适应函数。然后随机产生一批初始染色体,根据各染色体的适应函数值进行繁殖、交叉、变异等遗传操作,产生下

一代染色体。经过逐代遗传,通过随机的和结构化的交换各染色体之间的信息,产生更加优秀的染色体,最后将这些染色体解码还原,就可以获得问题的解。遗传算法从初始点沿多路径进行搜索,寻优能力强,适用于求解大规律、多变量、多约束、非线性离散问题,可避免“维数灾”问题,但是存在计算速度慢、处理效率低的缺点。虽然通过变异算子增强解群的多样性和保证全局搜索能力,但容易导致盲目搜索,产生“早熟收敛”。

进入九十年代以后,遗传算法作为一种新的全局优化搜索方法,在规划设计、组合优化、机器学习、自适应控制和人工智能等方面得到了极为广泛的应用,尤其是它成功地解决了传统搜索方法难以处理的复杂的非线性问题。可以预见,遗传算法是 21 世纪有关智能计算的关键技术之一。采用遗传算法的无功优化,其目标函数多为系统的有功网损最小,约束条件为实际电力系统的各种约束。它应用于无功优化的核心问题是:如何针对实际变量进行交叉、变异等遗传操作,如何进行适应值函数的构造和遗传算法收敛判断的确定等。遗传算法应用于无功优化就是给出在电力系统环境下的一组初始解,受各种约束条件的限制,通过适应值评估函数来评价其优劣,适应值低的被抛弃,只有适应值高的才有机会将其特性迭代到下一轮解,最后趋向于最优解。

遗传算法有很多引申算法,比较有代表性的有并行遗传算法、免疫算法及免疫遗传算法。并行遗传算法采用种群密度将原种群分化为若干子种群独立进化,相互之间通过“迁移”交互信息,可以有效解决普通遗传算法的“早熟”和收敛慢的缺陷,提高收敛速度和解的精度。免疫算法模拟人体免疫系统的识别,并消灭异己物质的功能,将目标函数和约束条件比作抗原,解比作抗体,通过计算彼此的亲和度和抗体浓度来选择适应度好的抗体,利用抗原的记忆作用,提高局部搜索能力,达到求解目的。免疫遗传算法将免疫算法维持免疫平衡的机制作用于遗传算法中个体浓度的抑制与促进过程,将抗原的记忆识别功能引入遗传因子中,兼顾全局和局部搜索两方面,具有良好的收敛性和寻优特性。

1.2.2 考虑谐波因素的电力系统无功优化

近年来,对谐波问题的研究颇为活跃,主要是研究谐波造成的危害、谐波分析方法及一些抑制性措施,而对受谐波污染的电力系统的无功优化补偿理论的研究,即在满足系统安全约束和电能质量指标的前提下^[12],确定使受谐系统正常运行时网损最小和谐波影响最小的最佳无功补偿配置的研究,国内外文献报道的很少。

在谐波分析方面传统的分析方法主要有支路追加法,就是将补偿电容器看作要追加

的支路,当补偿容量发生变化时,增加或减少阻抗矩阵的相应元素即可,其具体过程和支路追加法一样。通过支路追加法,可以得出补偿电容器组和各支路谐波电流之间的关系,从而进行分析。近年来已发展出了一些有效的电力系统谐波分析方法:其中有考虑负荷电流的电压数学模型,用 N-R 方法与基波潮流联立求解的谐波潮流计算方法;以及一类以恒定电流源表征非线性负荷,以恒定阻抗模拟线性负荷的谐波潮流分析方法,与基波潮流计算相比,谐波潮流分析须处理更为复杂的系统,更为大量的数据。

在非正弦周期电路中,传统的无功功率定义是对稳态周期电路而言的,而在受谐波污染而呈非正弦周期性的电力系统中,则失去了其有效性,近年来,对非正弦周期电路中的无功功率进行了大量讨论,提出了一些有价值的定义,并在此基础上提出了对畸变无功电流进行有源补偿的设想。

受谐波污染的电力系统中,无功补偿电容器参数优化的研究曾有以无功电流最小为目标,补偿电容器电容值为变量,用 0.618 法进行的优化算例,但是由于在对系统所做的简化中,没有考虑网络中各补偿点的相互作用,因此结果也是十分粗糙的。应用大系统理论对滤波器的参数进行优化选择,是一个没有考虑系统及各补偿点间相互作用的方法,难以用于规划全系统补偿装置参数。

就电容器组对谐波污染的放大特征已经有了一些理论分析结果,但是网络中的补偿装置处于不同的方式时,它们对谐波污染的影响是不同的,加之系统结构的复杂性,还难以统一描述补偿装置的谐波响应。以系统分析为手段,用非线性规划法进行全网无功补偿装置的配置,由于没有考虑参数配置与原有无功设置方案的协调,使网络计算过于复杂,从而使其收敛十分困难,耗费计算机时太长。

这里介绍一下对这一课题已有的具体解决办法:

首先从全系统的观点出发,研究受谐波污染的电力系统无功优化补偿的理论和实用技术,用传统的谐波潮流计算方法具体分析了谐波电压与补偿容量间的关系,提出了用谐波导纳矩阵建模的思想;在不考虑谐波作用的基波无功优化补偿容量配置的基础上,以电网电压最接近于系统运行的期望值为目标,建立了两个计算用数学模型^[12]:一是用近似规划法求解的优化规划数学模型,二是用牛顿法导出的灵敏度线性化优化数学模型。下面简要介绍这两个模型:

模型一:

目标函数为

$$\min J = \sum_{i=1}^n |\dot{V}_{bi} + \dot{V}_{hi} - \dot{V}_{oi}| \quad (1-3)$$

等式约束为:

$$\dot{Y}_b \cdot \dot{V}_b = \dot{I}_b$$

$$\dot{Y}_h \cdot \dot{V}_h = \dot{I}_h$$

$$h = 2p + 1, p = 1, 2, 3, \dots$$

不等式约束为:

$$C_{\min} \leq C_i \leq C_{\max}$$

式中:

$\dot{V}_{bi}$ —节点基波电压;

$\dot{V}_{hi}$ —节点谐波电压;

$\dot{V}_{oi}$ —节点所期望的运行电压值;

h —谐波次数;

C —为电容器投切容量;

模型二:

模型二所用方法不是正规的规划模型, 过程如下:

假设有一组电容器为 $C_{0p} = \{c_1, c_2, \dots, c_M\}$, 其值满足如下等式:

$$\dot{V}_h(C_{0p}) + \dot{V}_b(C_{0p}) = \dot{V}_0 \quad (1-4)$$

式中:

$\dot{V}_h(C_{0p})$ —补偿电容器投入电网后, 电网的谐波电压;

$\dot{V}_b(C_{0p})$ —补偿电容器投入电网后, 电网的基波电压;

$\dot{V}_0$ —节点所期望的运行电压值;

然后得到:

$$\dot{V}_h(C_{0p}) + \dot{V}_b(C_{0p}) - \dot{V}_0 = 0 \quad (1-5)$$

再表达为函数形式：

$$F(C_{0p}) = \dot{V}_h(C_{0p}) + \dot{V}_b(C_{0p}) - \dot{V}_0 \quad (1-6)$$

然后 $F(C_{0p})$ 对 C_{0p} 求灵敏度，最后通过判据来判定收敛情况。

上述两个模型简单、易于求解，容易满足实时性的要求，但在建模方面都没有考虑到国家标准对于谐波的规定^[13]，对于具体的各次谐波也没有采取必要的限制措施，而且对于补偿节点较多，规模较大的电网可能最后有不收敛的情况。

1.3 本论文的主要工作

本文在参考上述文献的基础上，结合胜利油田有限公司孤岛采油厂孤四管理区配电网网络自动化改造，提出了一套符合实际情况的数学模型，并对遗传算法进行了改进，通过对具体算例的计算，表明了本文模型和算法在解决这一问题上的有效性。主要工作如下：

(1) 结合配电网的实际情况，并以国家标准的相关要求来建立考虑谐波因素的配电网无功优化规划数学模型；

(2) 就配电网中的谐波电压和灵敏度之间的关系进行分析，得出用于指导遗传算法进行寻优的灵敏度矩阵；

(3) 用灵敏度方法对传统遗传算法进行改进，提高遗传算法寻优的针对性，加快寻优速度、提高搜索精度；

(4) 研制配电网无功优化规划软件模块，并对实际算例进行计算和结果分析。

第二章 基于谐波影响下的配电网无功优化数学模型

2.1 孤四区的配电网络概况

孤岛采油厂孤四生产管理区内 6kV 线路共 18 条, 共计 81.5 公里, 10/0.4kV 配电变压器 143 台, 总容量 30105kVA。孤四区配电系统主要存在以下问题:

(1) 电网结构不合理, 网损大, 故障处理能力弱。由于油田生产的特殊性, 油田初期滚动开发的特点, 供配电网络边建设边生产, 井口位置分散, 整个管理区配电网络结构复杂、结构不尽合理, 电网损失较大, 平均网损 10%。受自动化条件的限制, 不能够进行电网优化运行, 管理水平落后, 电网故障反映时间长, 故障处理和恢复供电能力弱。

(2) 配电系统功率因数较低、无功损耗大。由于用电设备负载率及变压器负荷率均较低, 造成整个供配电系统功率因数较低, 无功损较大。

(3) 近年来油田日益广泛地采用高技术、高效益的交直流传动系统, 驱动装置逐步由恒速的交流电动机传动改为可调速的电气传动系统, 使得油田配电系统中电力半导体装置日益增多。同时, 油田配电系统中大量的电焊机、抽油机配电变压器等非线性负载都会在电网中产生无功和不同频率与幅值的高次谐波, 其中以电力半导体装置所产生的高次谐波最为严重, 约占总谐波发生源的 70%以上。

(4) 配电网线路多采用闭式网络结构, 但采用开式运行, 因此网络常呈现梳状。在配电网中, 往往只有一个电源点, 故线路上的功率通常具有单向流动性且一般线路上的负荷点无表计, 负荷资料短缺不全^[14-15]。另外, 配电网线路电阻与电抗大小相接近, 甚至电阻值超过电抗值。

2.2 无功优化模型的建立

电网中的谐波电压对无功补偿电容器的安全运行影响很大, 谐波电压迭加在基波电压之上, 使电容器承受的电压变大, 在补偿电容器容量配置不适当时, 易因产生谐波放大或谐振而降低电容器的使用寿命或使电容器烧坏, 进而对整个电网的安全运行起着破坏性作用。考虑有谐波作用的无功优化规划的工作, 是一个多变量、多约束条件的优化规划问题, 而且计算量较大, 必须研究实用的数学模型和规划算法。本文提出的模型有效地避免了谐波谐振, 减小了谐波放大, 改善了电压质量。谐波部分的模型根据 GB/T14549-93《电能质量—公用电网谐波》的相关标准来建立^[16]。下面给出具体的建模

过程。

本文以年总支出费用最小为目标函数，目标函数中主要有两方面，无功补偿设备的投资 I 和网络损耗的年运行费，其中无功补偿设备的投资 I 包括不定部分和固定部分，不定部分指电容器设备费与购买容量成正比，也就是购买电容器的费用；固定部分指配套安装费用与检修费用，与购买容量无关，具体表示如下：

$$I_c = \sum_{i \in N_{PQ}} (\alpha f_i + K_c Q_{ci}) \quad (2-1)$$

式中：

N_{PQ} —PQ 节点集合；

f_i —节点 i 的安装费用，文中取电容器总投资的 10%；

K_c —电容器单价，取 50 元/kVar；

Q_{ci} —是节点 i 的安装容量；

α —逻辑变量，当节点 i 有安装补偿装置时取 $\alpha=1$ 否则 $\alpha=0$ 。

网络损耗的年运行费用 O_c 可表示为

$$O_c = \beta T_{\max} \Delta P \quad (2-2)$$

式中：

γ —全年全网能耗损失费用；

β —电能单价，文中取 0.5 元/kWh；

$T_{\max}$ —最大负荷利用小时数，文中取 3500 小时；

ΔP —电网的有功损耗

$$\Delta P = \sum_{(i,j) \in N_b} g_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij})$$

g_{ij} —线路的互电导；

N_b —所有支路集合。

因此目标函数为：

$$\min f_Q = \gamma I_c + O_c \quad (2-3)$$

式中:

γ —投资的回收率。

本文将各节点基波电压和总谐波畸变率越限的情况以惩罚项的形式加入到目标函数中。各惩罚项如下所示:

$$F_V = \sum_{i \in N_c} |V_i - K_i V_i| \quad (2-4)$$

$$H_V = \sum_{i \in N_h} \left(\sqrt{\sum_{h=3}^{2n-1} U_{ih}^2} - t_i V_i \right) \quad (2-5)$$

式中:

F_V —基波电压越限以后, 将各节点电压减去电压约束值后的和函数;

N_c —基波电压越限点的集合;

K_i —根据国家标准确定的各次谐波电压允许的最大值;

H_V —节点电压总谐波畸变率越限后进行处理和函数;

N_h —电压总谐波畸变率越限的节点集合;

t_i —由国家标准制定的电压总谐波畸变率不得越限的最大值系数。

将上述的两式加入到中就构成了最终的目标函数, 再加上基波与谐波潮流以及状态变量的约束条件, 优化模型如下所示:

(1) 目标函数:

$$\min J = f_Q + \lambda_F F_V + \lambda_H H_V \quad (2-6)$$

目标函数中, 第一项代表基波网损和总投资, 第二项代表基波电压越限后的惩罚项, 第三项代表电压总谐波畸变率越限后的惩罚项。

式中:

λ_F —基波电压越限的惩罚系数;

λ_H —总谐波畸变率越限后的惩罚系数。

(2) 等式约束:

基波潮流约束:

$$P_{Gi} = P_{Di} + V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2-7)$$

$$Q_{Gi} = Q_{Di} + V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2-8)$$

谐波潮流约束:

$$\dot{I}_h = Y_h \dot{U}_h \quad (2-9)$$

式中:

N_i —为所有节点集合;

V, θ —基波电压的幅值和相角;

P_{Gi} —发电机有功功率, 本文为配电网, 所以取为 0;

Q_{Gi} —发电机无功功率, 取 0;

P_{Di} —负荷的有功功率;

Q_{Di} —负荷的无功功率;

G_{ij}, B_{ij} —基波导纳矩阵中的元素;

$\dot{U}_{ih}$ —i 节点第 h 次谐波电压;

Y_h —谐波导纳矩阵;

$\dot{I}_h$ —谐波注入电流。

(3) 不等式约束:

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (\text{配电网各节点基波电压的限制})$$

$$U_{ih} \leq k_h V_i \quad (\text{配电网各节点各次谐波电压的限制})$$

$$N_{ci\min} \leq N_{ci} \leq N_{ci\max} \quad (\text{各补偿点可投切电容器组数})$$

式中：

K_h —为各次谐波电压越限系数；

N_c —各节点补偿电容器组的集合。

(4) 控制变量和状态变量：

控制变量为： $[N_c]$

状态变量为： $[V, U_h]$

本文模型充分考虑了谐波的因素，建立了兼顾降低网损与抑制谐波的配电网无功优化规划模型，既考虑了电压的质量又考虑了投资，具有较强的实用性。

第三章 配电网谐波潮流计算

确定系统在一定的运行方式下,由非线性负荷产生的谐波污染在全系统中的分布,对于系统的谐波分析和治理是十分重要的。而要进行谐波潮流分析首先需要建立除非线性设备外的所有网络元件的数学模型,由于谐波潮流计算是一项十分庞杂的计算,所以尽管从理论上讲,电力系统的元件都具有非线性,为了计算的实现,还是把除变压器的激磁支路以外的元件皆以线性模型等效,这样获得的网络等值模型是线性模型。本文考虑的是配电网,只有辐射状的支路,故变压器不作考虑,本章详细介绍网络元件的谐波模型和相应的谐波潮流计算。

3.1 网络元件的谐波模型

在进行谐波潮流求解时,应先确定谐波网络的数学模型。它是由网络中各有关元件的谐波参数组成的,通常用谐波网络的节点导纳矩阵表示。如前所述,电力系统中的谐波源主要是一些用电设备和部分变压器的励磁支路。这些谐波源产生的谐波电流基本上只决定于它们的工作条件和外加电压,与外电路的阻抗关系不大,因此,往往将这些谐波源看作内阻无穷大的恒电流源,先计算各谐波源节点的注入谐波电流,然后通过该谐波网的网络方程求解各节点谐波电压,各谐波源的谐波电流由该节点的电压和谐波源特性确定。供电系统节点电压的谐波畸变率一般小于5%,在确定谐波源的谐波电流时,可只考虑其外加基波电压的作用,只有对个别谐波电压较大,尤其是接近谐振的情况下,才需要考虑谐波影响,此时可经过迭代计算求解了。

谐波潮流计算也有它本身的一些特点应予以注意。

首先,由于发电机产生的电动势基本上是正弦波形的,其谐波含有率可以不计,因而通常不把它作为谐波源看待,其谐波电动势为零。其次谐波功率一般较小,因而计算一般只着眼于电流、电压,只在个别情况下,如校验一些元件的发热情况等,才需要计算谐波功率。

还应说明,谐波计算所需数据,如系统各元件的频率特性和谐波参数,各谐波源的频谱特性尤其是柑频特性等数据,往往很难取得足够准确的资料,这是影响计算精度的主要原因。线路的电感、电容可认为是与频率无关的常量,因而其谐波电抗和电纳等于其基波电抗和电纳值乘以谐波次数 h 。

本文是关于配电网的无功优化规划,网络模型主要以线路和负荷为主,下面进行详

细的介绍。

3.1.1 配电线路的单相模型

这里所讲的输电线主要以架空线路为主。目前在大多数技术资料中，都把输电线简单地处理为三相平衡系统，其主要原因是因为现代电力系统技术日趋发达，已经能够较好的保证系统运行在三相平衡状态下。而且在工频情况下，简化处理的结果比较符合实际，同时也降低了计算的复杂程度。

输电线路是分布参数电路，经过完全换位的线路可以看作是三相对称的。计算中通常以集中参数的等值 π 型电路表示，如图3-1所示。

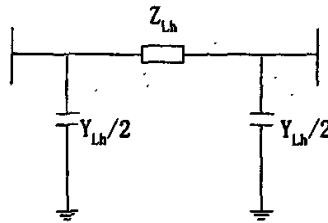


图3-1 单相输电线路的谐波等值参数

基波计算时，等值电路参数常常为分布参数的简单集中，即

$$Z_{L1} = (r_1 + jx_1) \cdot l \quad (3-1)$$

$$Y_{L1} = jb_1 \cdot l \quad (3-2)$$

上式中， r_1 、 x_1 、 b_1 ——分别为线路单位长度的基波电阻、电抗和电纳(架空线路小于200-300km)。当距离较长时需要加以修正，或增加等值 π 串接的数目，即避免每个等值 π 所代表的线路过长。

但谐波时线路的分布特性将比基波时大为缩短。线路的电感、电容可认为是与频率无关的常量，因而其谐波的电抗和电纳等于其基波电抗和电纳值乘以谐波次数 h 。如果考虑集肤效应时，线路的有效电阻值是将随谐波次数的增加而增加，线路的 h 次谐波单位长度电阻值 r_h 可有下面近似公式得到，

$$r_h = 0.288r_1 + 0.138\sqrt{h \cdot r_1} \quad (3-3)$$

对架空线路，若基波条件下代表的线路长为1km，则对 h 次谐波将限制为 $1/h$ km。从而，谐波计算所需要的等值 π 电路的数目也不相同，此时，采用双曲线函数计算等值电路参数将更为便利，每条线路只需要一个等值 π 型电路即可，其参数为

$$Z_{Lh} = Z_{ch} \sinh(r_h \cdot l) \quad (3-4)$$

$$Y_h = 2 \frac{chr_h l - 1}{Z_{ch} shr_h l} \quad (3-5)$$

式中, Z_{ch} 、 r_h 分别为 h 次谐波时线路的特征阻抗和传播常数, 均为复数, 可由下式求得:

$$Z_{ch} = \sqrt{z_{0h}/y_{0h}} \quad (3-6)$$

$$r_h = \beta_h + j\alpha_h = \sqrt{z_{0h}y_{0h}} \quad (3-7)$$

式中, z_{0h} 、 y_{0h} 分别为 h 谐波时线路单位长度的阻抗和导纳, 其中电导可忽略。

电网中的输电线距离较短, 而且谐波计算考虑的次数较低(本文只计算到11次)时, 可以忽略输电线的对地电容、相间电容和电导, 这样输电线的谐波模型可以简化采用R-X串联电路, 如图3-2所示。图中, R_h 、 X_h 分别为输电线的谐波电阻和谐波电抗;



图3-2输电线谐波等值电路

工程中输电线的单位长度谐波阻抗可按下式简化计算:

$$Z_h = r_h + jX_h = (0.288r_1 + 0.138\sqrt{hr_1}) + jhX_1 \quad (3-8)$$

式中 Z_{h1} ——输电线每公里 h 次谐波阻抗;

R_{h1} ——输电线每公里 h 次谐波电阻;

X_{h1} ——输电线每公里 h 次谐波电抗;

R_1 ——输电线每公里基波电阻;

X_1 ——输电线每公里基波电抗。

上述分析是基于平衡电力系统情况下的单相模型。

3.1.2 输电线路的三相模型

对于谐波分布不对称的电网, 采用输电线三相谐波等值 π 模型。首先, 推导输电线路的三相串联阻抗矩阵。文献^[43, 49, 61]研究表明, 对于单回三相输电线, 不管有无架空地线, 最后都可以化为如下的电压平衡方程式^[57, 62]:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{aa} & Z'_{ab} & Z'_{ac} \\ Z'_{ba} & Z'_{aa} & Z'_{bc} \\ Z'_{ca} & Z'_{cb} & Z'_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

等效图如图3-3

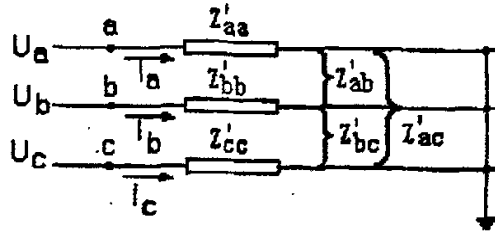


图3-3 三相架空线路参数计算图

Z'_{ij} 表示 i 、 j 相之间的互阻抗，当 $i=j$ 时为自阻抗。在完全换位的情况下，可知 $Z'_{ba} = Z'_{ab} = Z'_{bc} = Z'_{cb}$ ，式3-9可表示为

$$Z'_{ba} = Z'_{ab} = Z'_{bc} = Z'_{cb} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

或简写成 $U_{abc} = Z_{sm} I_{abc}$ 。

其次，推导输电线路的三相并联导纳矩阵。在一般 π 形等值电路模型中，如果不计输电线的电晕损失，则输电线的并联导纳矩阵中各元素仅由电纳（虚部）部分组成，反映的是导线带电时在周围介质中建立的电场效应。计算输电线的并联导纳矩阵就是计算输电线的电容矩阵。文献^[43, 49, 60]研究表明，可列出电位平衡方程式^[49, 57]

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P'_{aa} & P'_{ab} & P'_{ac} \\ P'_{ba} & P'_{bb} & P'_{bc} \\ P'_{ca} & P'_{cb} & P'_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

其电容矩阵可写为

$$[C'_{abc}] = [P'_{abc}]^{-1} = \begin{bmatrix} C_{aa} & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ba} & C_{bb} & -C_{bc} \\ -C_{ca} & -C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

若输电线路换位，可知 $P'_{ba} = P'_{ab} = P'_{bc} = P'_{cb}$ ，则并联导纳矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} = j2\pi f C'_{abc} = j2\pi f \begin{bmatrix} C_{aa} & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ba} & C_{bb} & -C_{bc} \\ -C_{ca} & -C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

综合以上分析，式3-9、式3-13中串联阻抗矩阵和并联导纳矩阵就是三相输电线 π 形模型的集中参数。这两种矩阵都可以用复合导纳表示，如图3-4所示，I, K 为三相节点。

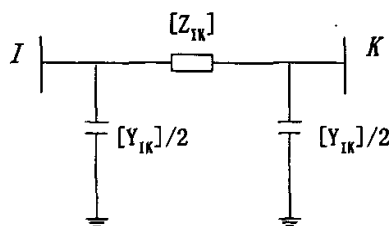
图3-4 三相短传输线的集中参数 π 形模型复合导纳

图3-4中，在 h 次谐波下， Z_{IK} 用 hZ_{IK} 代替， Y_{IK} 用 Y_{IK}/h 代替，便得到谐波下的三相等值 π 形模型。

3.2 综合负载模型

在谐波分析中，负荷的特性一般是用谐波阻抗表示的。为了进行各次谐波频率下的正弦稳态分析，可以把负荷的谐波阻抗写成解析式或综合成电路。应当注意到目前使用的“谐波阻抗”是定义在假设条件下的，可以从电路分析的角度来了解这个条件：假设电网中所有在正弦激励下能产生与激励不同频率的正弦电流或电压的电气设备，都可用与各自产生的电流或电压大小相等、方向相同的等效电源所替换。这个替换后的电网某端口，在某次谐波频率下的阻抗，就是通常称为的谐波阻抗。

负荷谐波阻抗模型可以分为二类：一类是独立用电设备的模型；另一类是对电网中某些注入点进行集中模拟获得的总体模型。决定谐波阻抗的方法目前主要有以下几种。

(1) 直接测量

在适当的频率范围内，在不同频率下进行测量，然后再在需要的频率下进行插值计算。这种模型的准确性受到两方面的限制，即测量本身的合理性与准确性，另一方面是插值的准确性，测量工作量是十分大的。

(2) 统计模型

利用有关统计资料建立用电系统的数据库，按照一定的数学规律对系统进行模拟，目前在电力系统稳定性研究方面已经采用了这类模型。

(3) 功率模型

就是由已知注入点的工频有功功率和无功功率，分析注入点的谐波阻抗特性。

电力系统有各种各样的负荷，其中差别也很大，对其精确描述较为困难，在谐波情况下可把系统负荷大致分为谐波源负荷和非谐波源负荷两类，我们这里主要讨论的是非谐波源负荷的三相谐波模型。与同步发电机一样，负荷也向谐波提供并联通路。因此，

可以把负荷等效于系统母线的并联阻抗元件，并由 3×3 的节点阻抗矩阵描述。

实际情况下，只知道接于系统母线处的综合负荷的基波有功功率和无功功率，应当注意，接于系统母线的并联补偿装置和滤波装置不应该包含在综合负荷中，它们的谐波模型按并联元件进行建模。文献^[46, 57, 70]研究表明，一般可认为，综合负荷对正序谐波电流和负序谐波电流呈相同的阻抗。计算中采用如下导纳矩阵模型

$$Y_h = T \begin{bmatrix} 0.01y_h & 0 & 0 \\ 0 & y_h & 0 \\ 0 & 0 & y_h \end{bmatrix} T^{-1} \quad (3-14)$$

Y_h 为综合负荷在 h 次波下的负序导纳；

$$\text{式中 } T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}, \quad \alpha = 1 \angle 120^\circ$$

综合负荷在对称分量下的等值单相谐波导纳已经被人们较多地研究过。图3-5给出了四种表示基波有功功率和无功功率的组合模型^[35, 47, 48]。图3-5中， h 为谐波次数， V 为综合负载额定电压， P_{50} 表示基波下有功功率； Q_{50} 表示基波下无功功率。

模型(a)是斐松南(Pesonen)等人建议的。等效相导纳为

$$y_h = \frac{kP_{50}}{V^2} - j \frac{kQ_{50}}{V^2} \quad (3-15)$$

其中 $k = 0.1h + 0.9$ ，该模型适合电阻和电抗都随谐波变化的情况。

模型(b)中假设电抗与频率有关，但并联电阻保持恒定不变。等效相导纳为

$$y_h = \frac{kP_{50}}{V^2} - j \frac{kQ_{50}}{hV^2} \quad (3-16)$$

该模型适合电抗随谐波频率变化，而电阻是常量的模型。

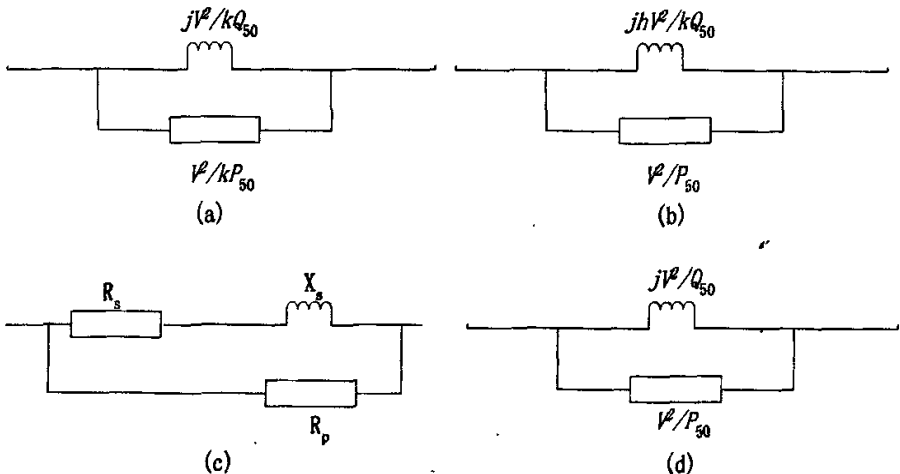


图3-5 谐波分析的负载模型

模型(c)是根据测量结果推导得出的。测量工作是利用声频纹波发生器在适当的电压负荷下进行的。等效相导纳为

$$y_h = \frac{1}{R + jX_s} + \frac{1}{jX_p} = \frac{R}{R^2 + X_s^2} - j \frac{R^2 + X_s^2 + X_s X_p}{X_p(R^2 + X_s^2)} \quad (3-17)$$

模型(d)认为对所有频率相导纳都保持不变, 相导纳为

$$y_h = \frac{P_{50}}{V^2} - j \frac{Q_{50}}{V^2} \quad (3-18)$$

本文已知各节点的负荷, 而且谐波潮流采用网络方程求解, 负荷最终要加入谐波导纳矩阵之中, 而且在以后的计算之中, 补偿电容器组也以导纳矩阵的形式加入, 所以按照图3-5的模型来等效负荷的谐波阻抗。

3.3 基波潮流计算

对配电网进行谐波潮流计算前, 要对整个网络进行基波潮流计算。配电网潮流计算方法很多, 有回路电流法、支路追加法、改进PQ分解法等, 本文考虑到计算模型的准确性, 采用牛顿-拉夫逊法进行计算。这种方法对辐射状或梳状的配电网以二阶的速度收敛。通过潮流计算可以得到网络中各个节点的电压和整个电网的网损, 可以验看电压质量是否合格, 网损是否偏大, 也可以与进行无功优化后的网络参数进行比较。本文采用VB6.0进行了相关的程序编制工作。通过界面输入整个配电网的负荷和线路阻抗等参数。并将这些数据形成数据库来进行管理。潮流计算的具体精度为 10^{-7} , 这已经足够精确, 具体过程请看程序流程图3-6。

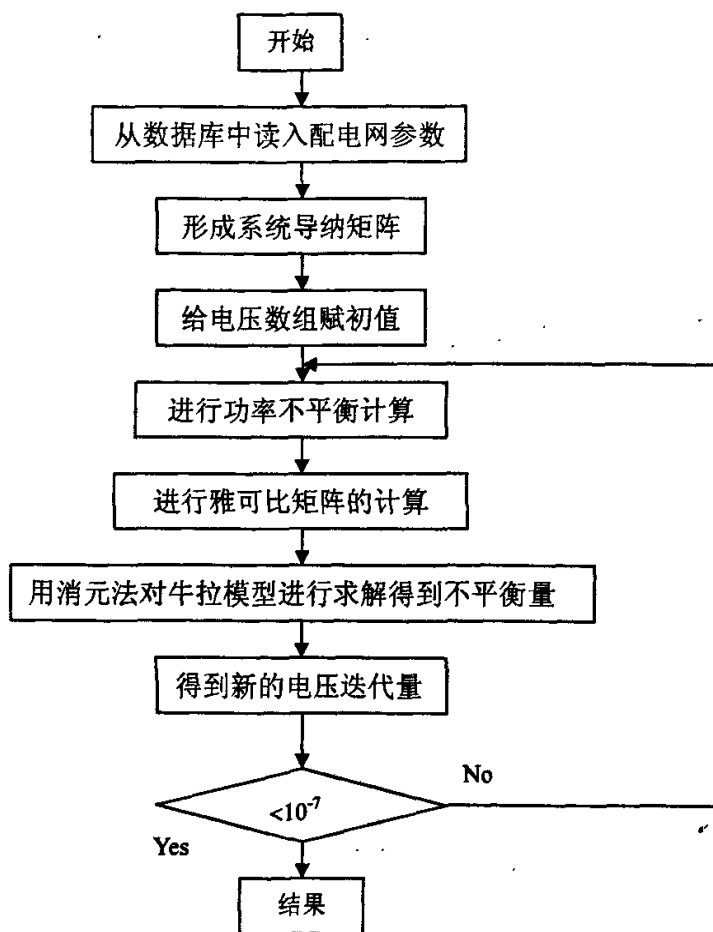


图3-6基波潮流计算流程图

3.4 谐波潮流计算

谐波潮流计算是电网谐波分析计算的主要任务之一，其基本任务是确定电网各节点的谐波电压大小和各支路谐波电流的大小，并判断是否存在谐波谐振，各次谐波电压与电压总畸变率是否符合国家标准等。谐波在不同电压等级之间的注入，常被称为谐波渗透^[53]，计算谐波源在电网中其他节点处产生的影响，常称为谐波分布计算^[43]。

电力系统谐波分布计算主要是指电力系统谐波潮流计算，通常概念中所涉及的潮流计算指的是关于电力系统三相对称的基波的电压分布，功率流动的计算，随着大量谐波涌入电网，人们便将潮流计算引入谐波分布中。谐波潮流和基波潮流之间密切相关。从能量平衡的角度来看，谐波源只是将从系统中吸收的部分基波功率转化为谐波功率，网

络中的谐波功率损耗应该在基波功率计算中得到平衡；同时，谐波源的注入电流与该节点的基波电压有关。下图3-7的电力系统等值电路可以直观表达基波潮流和谐波潮流之间的关系^[15]，发电机G代表基波正弦电压源，它经过系统阻抗 $R_s + jX_s$ ：供给一个静止变流器控制的电阻负载。

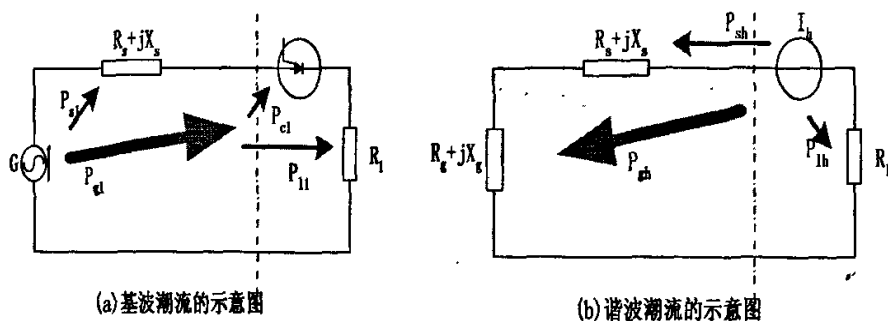


图3-7 电力系统中的基波和谐波潮流

如图3-7(a)所示， P_{sl} 为系统阻抗和线路消耗的功率， P_{cl} 为供给负荷的基波功率，其中大部分 P_{ll} 送给负载，另一部分 P_{sl} 将会转化为谐波功率。如图3-7(b)何所示，谐波功率 P_{sh} 和 P_{hl} 分别回馈到系统和发电机， P_{hl} 流入到负荷当中。在作潮流计算时，网络中各谐波相互作用引起网络的谐波功率损耗。从功率平衡来看，网络中的谐波功率是谐波源将一部分基波功率转换成谐波功率，因此网络中的谐波功率损耗需在基波功率的计算中取得平衡。

电力系统的谐波分析中，不仅要分析系统中存在哪些谐波源及其特性，还要分析它们产生的谐波电流在电力系统的各个部分如何分布，在各个节点产生多少谐波电压。目前，很多资料^[43, 44, 48]表明就谐波潮流计算等同于谐波电压分布的计算，将谐波潮流的计算省略。

选用电压电流方程，而不是用功率平衡，通常是出于以下几点：

- (1) 谐波功率的数值非常小，往往不到基波的1%；
- (2) 谐波源多数为电流源，建立谐波源模型时一般以分析谐波电流为重点；
- (3) 人们关心谐波对电气设备、测量仪表等的影响和对通信的干扰时，总是先关心电流而非功率；
- (4) 电压电流方程本身是线性的，便于求解，且能满足工程需要。

这一点在工程设计中无可厚非，但是忽略了谐波潮流计算可以判定谐波的流向。现代电力系统是一个多谐波源的系统，判断谐波源位置，对于谐波分析十分必要，有利于判断谐波源的影响，同时也能够帮助我们更准确有效地制定谐波限值。计算谐波功率方

向恰好可以解决谐波源定位问题^[52]。谐波等值电路如图3-8所示。

如果系统侧谐波源为零而用户侧谐波源不为零，则不管用户侧谐波源相位如何变化，根据谐波源的电源特性必有

$$R_e[U_h I_h] \leq 0 \quad (3-19)$$

反之，如果用户侧谐波源为零而系统侧谐波源不为零，则不管相位如何变化必有

$$R_e[U_h I_h] \geq 0 \quad (3-20)$$

如上所述，如果测得的谐波特性满足式（3-19），不管系统侧有无谐波源都能判定用户侧有谐波源；反之，如果满足式（3-20），能判定系统侧必有谐波源。

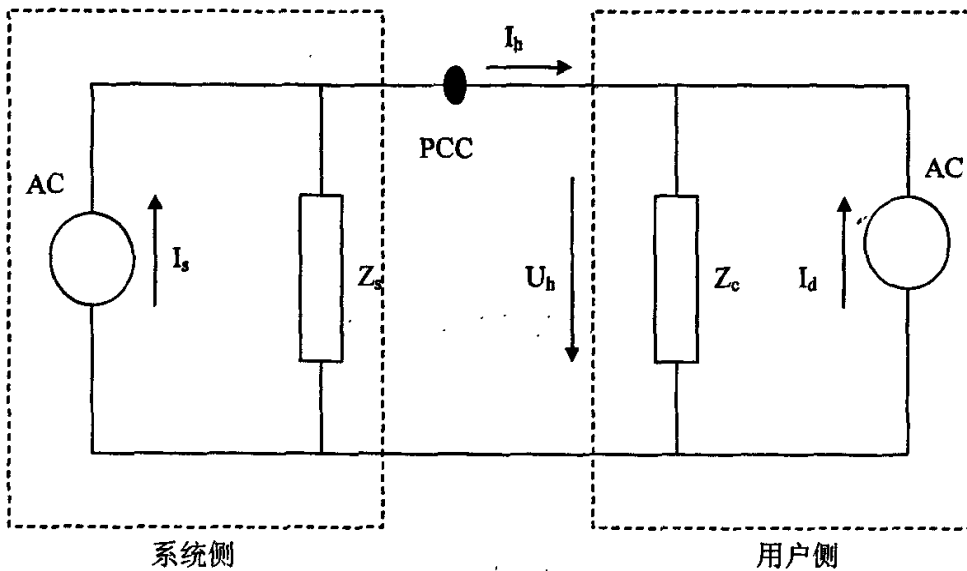


图3-8 公共连接点的谐波等值电路

如果在一段时间内，一部分测量结果满足式（3-19），另一部分满足式（3-20），则两侧都有谐波源。这一方法的局限性是只给出了谐波源存在的充分条件，而不是必要条件。

3.4.1 基本的谐波分析方法比较

基本的谐波分析方法分为非线性时域仿真，非线性频域分析与线性频域分析。这三种方法都对系统本身作了线性处理，只是对非线性装置的模拟方法不同^[45]。

1) 非线性时域仿真法

非线性时域仿真法是将电力系统各元件模型根据拓扑关系形成全系统模型，是一组联立的微分方程组和代数方程组。以稳态工况为初值，求出方程组的数值解，即系统的

状态量随时间的变化曲线。非线性时域仿真用暂态网络分析仪、模拟计算机和数字计算机书滋行。它能同时进行电力系统的暂态和稳态分析,并且很容易模仿各种暂态事故。己有多种软件如Matlab, Fmtdc能在数字计算朴比完成仿真分析,但解算规模不宜过大。

对于谐波问题,非线性时域仿真法从网络状态方程出发,求解电力系统谐波响应。对于电力电子器件组成的非线性装置可用一组周期动作的电子开关表示。该方法的缺点是逐步积分计算速度慢,耗时多。

2) 非线性频域分析法^[40]

非线性频域分析法是以谐波条件下节点的有功和无功潮流平衡为解算依据。谐波电压由节点导纳矩阵算出,非线性负荷产生的注入电流表示为基波与各次谐波以及非线性负荷特征变量(每个非线性负荷需2个,对应有功与无功功率平衡)的函数,用牛顿一拉夫逊法可得出修正方程。

该方法理论上较完整。但谐波功率较小,各次谐波视在功率通常小于基波时的百分之一,形成的雅可比矩阵元素敏感度较低,低收敛精度难以看到谐波功率影响,高收敛精度又影响收敛性。且规模比同节点的基波潮流计算要大得多,迭代的收敛性是主要问题。通常只适应较小规模。该方法的主要缺点是收敛性差。

3) 线性频域分析法

线性分析法通过线性化系统的非线性装置进行谐波分析。在忽略了次要因素后,可以近似认为非线性负荷的谐波电流在大小和相位上仅与基波电流成线性关系。给出基波电流以后,各次谐波电流即为已知。根据节点导纳方程可计算出各节点谐波电流:

$$[I_h] = [Y_h][V_h] \quad (3-21)$$

此处 I_h 、 V_h 均为矢量,本文中如果未强调,则 I_h 、 V_h 均是指矢量。该方法较为简单,不存在收敛性问题。是目前国内外使用最多的分析方法,尤其是检验滤波器效果和分析电容器分组投切的谐波放大现象时常常使用。

综上所述,非线性法由于考虑基波潮流与谐波潮流的相互影响,比线性法计算精度要高,但由于基波与谐波潮流联立迭代,非线性法方程维数多,计算量大;占用内存多,计算速度和收敛速度要慢;基波与谐波数值上相差较大,迭代过程中,基波电压的变化可能引起谐波电流的变化较大,不利于潮流的平稳收敛,甚至可能出现不收敛的情况;谐波电压初值选择不当,导致收敛困难。线性算法,在计算基波潮流时完全不考虑谐波的影响,使基波潮流和谐波潮流分立迭代计算,减少了计算量,提高了收敛性,但降低了计算精度。

结合线性法和非线性法两种算法的优点, 本文提出一种考虑多谐波源的谐波潮流解耦算法, 改变常规算法中将基波潮流与谐波潮流联立迭代的方法, 使基波潮流通过牛顿法迭代求解, 谐波潮流通过高斯消元法求解, 两者通过功率方程相关联, 并以此考虑基波与谐波之间的相互影响。谐波潮流对基波潮流的影响可主要由以下节点的功率方程式表达:

$$\begin{cases} P_i = P_i^1 + \sum_{k=2}^h P_i^k \\ Q_i = Q_i^1 + \sum_{k=2}^h Q_i^k \end{cases} \quad (3-22)$$

式中 P_i , Q_i 为节点 i 总有功和无功功率, P_i^1 , Q_i^1 为节点 i 的基波有功和无功功率, P_i^k , Q_i^k 为节点 i 的 k 次谐波有功和无功功率。

根据以上分析, 为保证计算精度, 同时避免常规非线性法将基波与谐波潮流联立迭代求解带来的种种问题, 可使基波与谐波潮流分立迭代。基波潮流通过牛顿法迭代求解, 谐波潮流通过高斯消元法求解, 两者通过功率方程(3-22), 并以此考虑基波与谐波之间的相互影响。

3.4.2 谐波分析模型

研究谐波渗透分析的基本方法中, 有单相模型分析法(也称为对称分量分析法)和三相模型分析法(又称为全相分析法)。下面分别介绍这两种分析方法。

(1) 单相分析法^[52, 53]

在对称负荷谐波潮流计算中, 因为三相平衡, 各电量的相位互差 120° , 因而可只按一相计算求得一相的谐波潮流后, 将相位超前或滞后 120° , 即可得另两相的谐波分布。采用“单相模型分析法”进行谐波分布计算时, 电力网络中元件的单相模型常以一个与谐波次数有某种函数关系的阻抗元件来模拟, 即 $Z=F(h)$, h 为谐波次数, 见图3-9

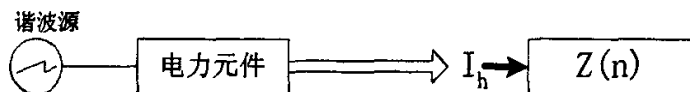


图3-9 电力系统元件的单相模型

一个交流三相电力系统通常总有若干个谐波注入点。在图3-10中, 假设有两组为对称分量的 h 次谐波 I_{1h} 和 I_{2h} , 注入到交流系统的任意两个母线上。如果交流系统为线性无

源系统，则可应用叠加原理分别计算各次谐波。

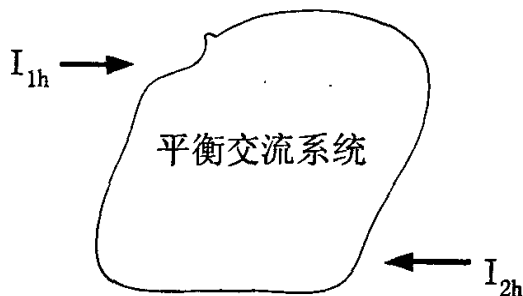


图3-10平衡电流注入到平衡交流系统

直接求解线性方程式(3-21)就可以得出系统内各母线公共连接点的谐波电压 $[V_h]$ 。式中， $[Y_h]$ 为系统的导纳矩阵。由于假设三相交流系统是对称的，所以它的模型中只包含正(或负)序分量的导纳。该这个算法可以模拟电力系统的稳态情况。不过遗憾的是，实际电力系统的谐波情况经常要随负载、发电机和线路结构的变化而改变。该算法称为单相模型分析法。

(2) 三相分析^[57]

电力系统的三相阻抗特性要受不对称负荷或输电线不对称的影响，还要受到线路间耦合的影响。由于有这些影响，网络元件自导纳和互导纳的不对称程度将有所增加。因此，在三相参数不同的非对称负荷网络中，三相情况不尽相同且互相影响，各序分量间又无相对的独立性，若在这种网络中通以某序分量的电流，所产生的压降中不仅含有该序分量，还可能其它序分量存在，因此，常规的单相模型分析法不能凑效。这时，用三相模型分析法，即从电路理论出发，将非对称的三相网络作为一个整体网络来分析、计算会更加准确、快速而有效。

用三相模型来模拟电力网络中的元件，图3-9中的 Z 将不只是一个谐波次数有关的函数，而是一个与谐波次数有关的函数矩阵，见图3-11。

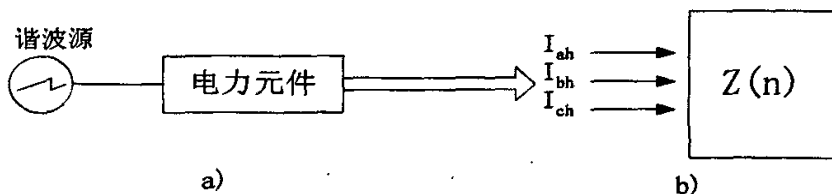


图3-11电力元件的三相模型

图3-5(b)中 Z 为谐波次数为 n 的 3×3 阶函数矩阵，即：

$$Z = [F_{(n)}]_{3 \times 3} \quad (3-23)$$

上式为电力元件的谐波模型，反映的是其在谐波状态下特性，该问题将在后面的章

节里详细探讨。

对于这种电力系统的三相不对称情况,可用图3-12表示。在这个图中,注入电流的大小和相位都可以是不对称的。与三相对称系统类似,假设每一种频率的注入电流都是恒定和已知的。直接求解线性方程式(3-21),就可以得出系统内任意三相节点的谐波电压。

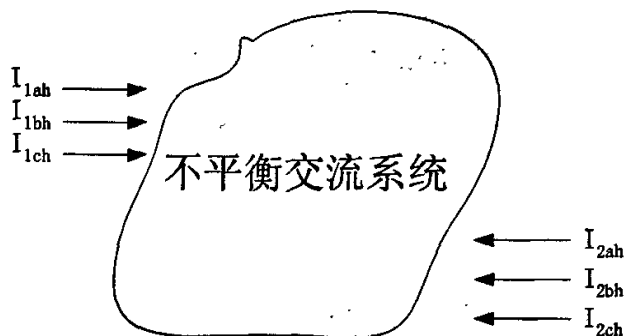


图3-12不平衡电流注入到不平衡交流系统

由于直接考虑了系统的A, B, C三相,它的模型应包含每一相的导纳。并且方程(3-21)要进行修正, $[I_h]$ 、 $[V_h]$ 、 $[Y_h]$ 的每一个元素都是由自导纳和互导纳组成的 3×3 阶阵。

上述算法称为三相模型分析法。

两种分析法的效果是不一样的。单相分析法需假定电力系统是完全三相对称的,研究表明,谐波下电力系统的不对称性较之基波下更为严重,谐波分布计算时由输电线造成的不对称一般不能忽略^[44],使用三相分析法则能方便地考虑电力系统的不对称性。

综上所述,本文中对电网谐波分布计算采用三相分析法,也称为全相分析法。

本文由于谐波源以恒定电流源的形式准确的给出,所以采用线性电流注入的方法来进行谐波潮流的计算。

本章详细介绍了潮流计算,包括基波潮流计算和谐波潮流计算,潮流计算是本文中最基本的计算,对了解配电网的运行情况是很重要的,以线性电流注入法最适用于本文的谐波潮流计算。

第四章 基于遗传算法的配电网无功优化

4.1 遗传算法介绍

遗传算法是模拟自然界进化过程搜索最优解的计算模型^[19-23],遗传算法早期的研究工作始于本世纪六十年代,当时美国的 Holland 正在从事自适应系统的研究,受达尔文适者生存,不适者淘汰的进化论思想启发,他和他的学生们首次应用模拟遗传算子来进行适应性研究。六十年代中期, Holland 开发了一种称之为遗传算法的编程技术,其基本思想是利用类似于自然选择的方式来设计计算机程序。1967 年 Bagley 发表了关于遗传算法应用的一篇论文并设计了一个可控制的试验棋盘来模拟六个棋子的下棋游戏。1970 年 Cavicchio 将遗传算法应用于模式识别,1971 年 Hollstien 完成了遗传算法在纯数学优化应用方面的第一篇学术论文,主要研究了五种不同的选择方法和八种杂交策略。也进行了大盆的函数优化方面的研究,从八十年代开始,遗传算法以其简单、通用、鲁棒性强和适于并行分布处理等特点及广泛的应用潜力,已经在许多领域中得到应用,而且越来越受到国际学术界的普遍重视,遗传算法已成为解决人工智能中一些困难问题的重要工具。

在工程科学中有许多复杂的组合优化问题和函数优化问题,这些问题大多数是非线性的,有些甚至不连续,还有的有多个最优解,用常规的数学优化方法无法有效的求解,只能对问题做简化的处理。由于遗传算法不依赖于问题本身,只要求问题是可解的,无连续性 & 可微性等要求,适应范围广,且能找到近乎全局最优的解,在解决这些优化问题时,遗传算法显示了其无与伦比的优越性。另外,当今计算机科学的各个领域几乎都显示出向并行计算过渡这一趋势,遗传算法以其内在并行性显示了极大的发展及应用潜力。

遗传算法是一种群体型操作,该操作以群体中的所有个体为对象。选择(selection)、交叉(crossover)和变异(mutation)是遗传算法的三个主要操作算子,它们构成了遗传操作(genetic operation),使遗传算法具有了其它传统方法所没有的特性。遗传算法中包含了如下五个基本要素:参数编码初始群体的设定;适应度函数的设计;遗传操作设计;控制参数设定(指群体大小和遗传操作的概率)。下面先介绍一下遗传算法的有关术语:

- (1) 种群: 一个由若干初始解组成的初始群体,用以维持其群体的生存;
- (2) 个体: 组成种群的解空间的一个解;

(3) 染色体:将初始解用一个二进制码串或十进制数码串来表示,它可以表示一组变量,也可以表示一个变量;

(4) 基因:为构成染色体的基本单位,是个体编码中的任一位,若用二进制表示则为 0 或 1;

(5) 等位基因:在两个染色体串中处于相等位置的基因;

(b) 适应值函数:又称为适应度(fitness),其函数值用来评估个体或解的优劣,并作为以后遗传操作的依据,它由目标函数转化而来,并要求与目标函数有相同的极值点和可行解域,且值域非负。这样就将目标函数的极小值问题,转化为求适应值函数的极大值问题;

(7) 选择:一种遗传操作,从当前群体中选出优良的个体作为父代为下一代繁殖子孙,选择的准则就是各自的适应值,通过选择,可以得到匹配库(mating pool),为交叉和变异操作所用;

(8) 交叉:从匹配库中随机选取两个个体作为父体和母体,再按交叉率随机地选取一个交叉位,然后将两个体中位于交叉位后的二进制串互换,保留交叉位前二进制串不变,从而形成两个新个体,它是获取优良个体的重要手段;

(9) 变异:是根据变异率将个体编码中每一位基因位进行 0、1 翻转,形成新个体的遗传操作。变异操作可以使适应值小的个体或整体素质趋于一致的个体发生变化,从而使每一代种群保持新鲜个体,避免未成熟收敛及随机漫游现象;

(10) 编码:主要采用 0、1 二值编码方式,将每一个优化参量用一定长度的码串来表示,多个优化参量就将各码串连接在一起,经过编码,形成了染色体串;

(11) 译码:是编码的逆过程,它将二进制码串的最优解转化成十进制数,从而得到优化量。

遗传算法是一个迭代过程,在每次迭代中都保留一组候选解,按其解的优劣进行排序,并按某种指标从中选出一些解,利用一些遗传算子如杂交和变异等对其进行运算,产生新一代的一组候选解,重复此过程,直到满足某种收敛指标为止。

遗传算法的主要特点是:

(1) 用参数集的编码(在基本遗传算法中用二进制编码)进行计算,不对参数本身进行操作;

- (2) 在一个空间内对变里的群体而不是对单一变量进行操作；
- (3) 用目标函数本身的信息来寻优，而不需要传统算法必须的连续和可导条件；
- (4) 采用随机转移规律，每个个体变量与另外个体变量的寻优无关，有内在的并行处理功能。

一个完整的遗传算法模型包括：1) 参数编码；2) 适应度函数的设计；3) 遗传操作设计；4) 控制参数设定(指群体大小和遗传操作的概率)；5) 终止进化条件的设定。

(1) 编码

确定控制变量的表示方案，将搜索空间的解映射成遗传空间的解表示。这一过程称为编码，其相反操作称作解码。对编码的基本要求是两个空间的解需一一对应且编码尽量简明。遗传空间的解又称为个体或染色体，个体通常由字符串表示，对于多变量问题，每一个变量对应整个字符串的一个分量，字符串的每个分量的每一位都称为遗传因子，多个个体组成一个群体。基本遗传算法用二进制进行编码。假设无功优化中电压幅值的变化范围为(0.9, 1.1)，字符串中每一个电压分量的二进制表示长度 $L=5$ ，则对应关系为 00000 对应 0.9，11111 对应 1.1，而长度为 5 的二进制编码的十进制范围为 0~31，对应变量范围为 0.9~1.1，因而精度为 $0.2/31=0.0064$ ，

一个代表 n 个电压的个体串可表示为：

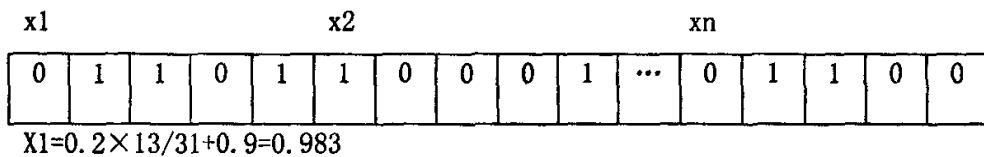


图 4-1 电压的个体串表示

(2) 确定适应值度量

适应值度量为群体中每个个体串指定一个适应值，并在此基础上进行再生或选择操作。作为一种随机搜索方法，遗传算法的适应值函数或目标函数不受连续可微的约束，而且函数的定义域可以为任意集合。一般遗传算法中，基本不用搜索空间的知识而仅用适应值。对适应值的要求是必须非负，而且一般遗传算法都是针对求最大值问题。如果是求函数最大值且原目标函数有负数的情况，可将其原目标函数加上一个使所有个体适应值非负的正常数作为适应值度量。如果是求函数最小值，可通过以下变换求解：

$$\text{Minf}(x)$$

$$\text{Max}F(x) = C - f(x)$$

其中 C 为某一个使 $F(x)$ 非负的常数。

(3) 确定遗传操作算子

进化过程中的优胜劣汰处理称为遗传操作，遗传算法有三种最基本的遗传操作算子：选择、交叉和变异。

选择的主要作用是从群体中选择优秀的父辈个体组成产生下一代的交配池。目前常用的策略都是以与适应值成比例的概率来进行选择。如轮盘赌策略，最优保存策略等。将所有个体的适应值相加，然后按照每个个体适应值占适应值总和的比例来分配其在轮盘上所占的比例，适应值越高，在轮盘上所占的扇面越大，被选中的概率越大，具体的选择步骤如图 4-2。选择算子的作用是提高群体的平均适应值，因为低适应值的个体趋向于被淘汰，而高适应值的个体趋向于被保留。选择算法并没有产生新个体，当然群体中最好个体的适应值不会改进。

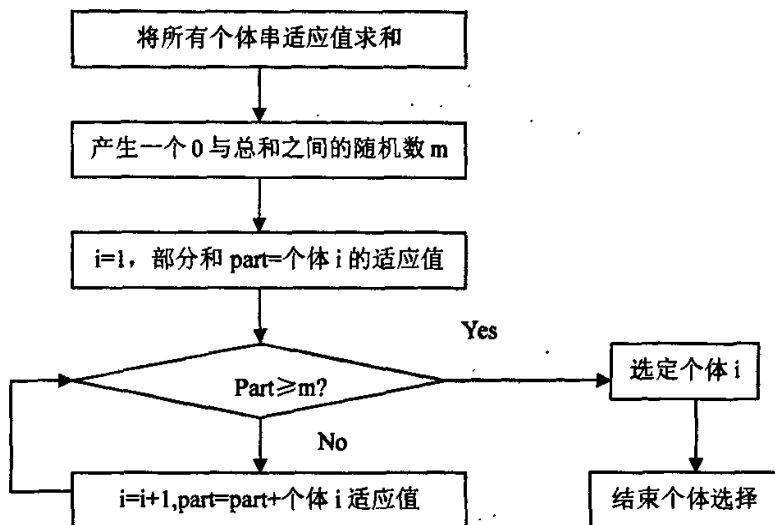


图 4-2 轮盘赌的实现

杂交算子是模拟生物界的有性繁殖。首先要根据杂交概率选择要进行杂交的父辈个体，然后随机选取两个父辈个体串进行杂交。简单的一点杂交过程如下：假设个体串长度为 L ，用随机数发生器产生一个 1 到 $L-1$ 间的随机数 i ，一点杂交的一个重要特征是它可产生与原配对串不同的子代个体串，假设杂交概率为 50%，意味着交配池中 50% 的个体将进行杂交，其余的 50% 将进行保留。杂交算子在遗传算法中起至关重要的全局搜索作用，

是遗传算法核心的操作算子，也是遗传算法区别于其他所有优化算法的根本所在。杂交可以把两个优良的模式传到下一代的某个串中，使该串具有父辈的性能，若杂交后得到的后代性能不佳，则可以在以后的选择过程中被淘汰。具体过程见表 4-1。

表 4-1 一点杂交

	旧个体	新个体
杂交	$X_1^1 X_2^1 \cdots X_i^1 X_{i+1}^1 \cdots X_l^1$	$X_1^1 X_2^1 \cdots X_i^1 X_{i+1}^2 \cdots X_l^2$
	$X_1^2 X_2^2 \cdots X_i^2 X_{i+1}^2 \cdots X_l^2$	$X_1^2 X_2^2 \cdots X_i^2 X_{i+1}^1 \cdots X_l^1$

变异算子具有增加群体多样性的效果。它以变异概率 P_m 随机地改变个体串上某些位的值，对于二进制编码的串，就是把相应的位从 1 变为 0 或从 0 变为 1。简单过程如表 4-2。

表 4-2 简单变异

	旧个体	新个体
变异	$X_1^1 X_2^1 \cdots X_i^1 \cdots X_j^1 \cdots X_l^1$	$X_1^1 X_2^1 \cdots Y_i^1 \cdots Y_j^1 \cdots Y_l^1$

(4) 确定控制运算的参数和变量

控制遗传算法的主要参数有群体规模 N (即每一代群体中的个体数)，算法执行的最大代数 M 、选择概率 P_r 、杂交概率 P_c 和变异概率 P_m 等。 P_r 、 P_c 、 P_m 的选择和设定目前尚无统一的理论指导，多数视具体情况而定。若群体规模 N 太大，每代需要的计算量也越大，可能导致计算机运算时间延长。若 N 太小，则样本量不充足，容易过早收敛或局部最优。杂交概率 P_c 越高，群体中串的更新就越快， P_c 过低，搜索会停滞不前。变异概率 P_m 太大，则遗传算法的性能接近于随机搜索，如 P_m 太小，会使遗传算法性能下降。

(5) 确定收敛判据

常规的数学规划法一般有比较严格的收敛判据，但遗传算法的收敛判据基本上是启发式的，它不需要梯度等信息，因而其适用范围很广。目前采用的遗传算法收敛判据有很多种：根据计算时间和采用的计算机容量的限制所确定的判据，如以最大遗传迭代次数作为收敛判据；从解的质量方面确定的判据，如连续几次得到的解群中最好的解无变化则认为遗传算法收敛，或最好解的适应值与平均值之差小于某一设定常数则认为算法

收敛。

确定遗传算法的要素之后，就可以按图 4-3 的步骤来进行遗传算法的运算。

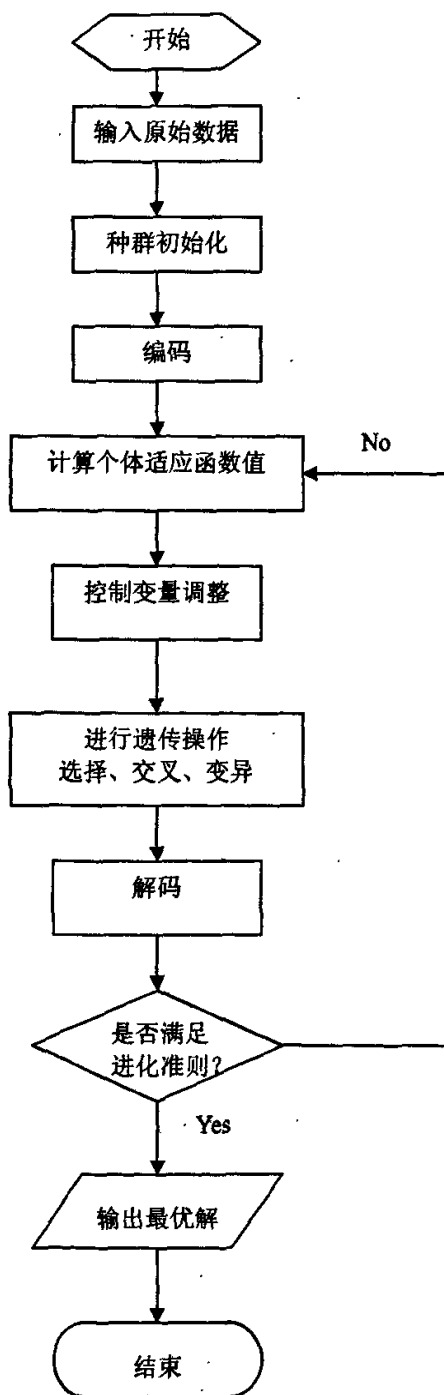


图 4-3 遗传算法流程图

4.2 遗传算法与灵敏度的结合

4.2.1 灵敏度计算

本文考虑的是谐波电压对作为无功补偿电容器的灵敏度关系，试图通过这个关系找到使谐波电压满足国标要求的电容器组合。下面具体的介绍一下本文灵敏度公式的推导。

本文谐波潮流采取线性电流注入法来求解。推导过程如下：

$$\dot{Y}^{(h)}\dot{V}^{(h)} = \dot{I}^{(h)} \quad (4-1)$$

将该线性方程组化为直角坐标的形式

$$\text{令 } \dot{Y}^{(h)} = G^{(h)} + jB^{(h)}, \quad \dot{V}^{(h)} = e^{(h)} + jf^{(h)}, \quad \dot{I}^{(h)} = I_x^{(h)} + jI_y^{(h)}$$

可得：

$$\begin{bmatrix} G_{11}^{(h)} + jB_{11}^{(h)} & G_{12}^{(h)} + jB_{12}^{(h)} & \cdots & G_{1j}^{(h)} + jB_{1j}^{(h)} & G_{1n}^{(h)} + jB_{1n}^{(h)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{i1}^{(h)} + jB_{i1}^{(h)} & G_{i2}^{(h)} + jB_{i2}^{(h)} & \cdots & G_{ij}^{(h)} + jB_{ij}^{(h)} & G_{in}^{(h)} + jB_{in}^{(h)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{n1}^{(h)} + jB_{n1}^{(h)} & G_{n2}^{(h)} + jB_{n2}^{(h)} & \cdots & G_{nj}^{(h)} + jB_{nj}^{(h)} & G_{nn}^{(h)} + jB_{nn}^{(h)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1^{(h)} + jf_1^{(h)} \\ \vdots \\ e_i^{(h)} + jf_i^{(h)} \\ \vdots \\ e_n^{(h)} + jf_n^{(h)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{1hx}^{(h)} + jI_{1hy}^{(h)} \\ \vdots \\ I_{ihx}^{(h)} + jI_{ihy}^{(h)} \\ \vdots \\ I_{nhx}^{(h)} + jI_{nhy}^{(h)} \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

将方程整理后得到：

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n (G_{ij}^{(h)} e_j^{(h)} - B_{ij}^{(h)} f_j^{(h)}) &= I_{ihx}^{(h)} \\ \sum_{j=1}^n (B_{ij}^{(h)} e_j^{(h)} + G_{ij}^{(h)} f_j^{(h)}) &= I_{ihy}^{(h)} \end{aligned} \quad (4-3)$$

(i=1, 2 ; 3.....)

其中 G_y , B_y 为 h 次谐波电导与电纳, e_j , f_j 为 h 次谐波电压实部与虚部, I_{ihx} , I_{ihy} 为 h 次谐波注入电流实部与虚部。本文中灵敏度矩阵是指各次谐波电压对补偿电容器的灵敏度，下面通过(4-3)式来求灵敏度矩阵。

i 节点谐波电压对 i 节点电容灵敏度为：

$$\frac{\partial e_i^{(h)}}{\partial c_i} = \frac{\partial e_i^{(h)}}{\partial B_y^{(h)}} \times \frac{\partial B_y^{(h)}}{\partial c_i} = \frac{k\omega f_i^{(h)}}{G_y^{(h)}}$$

$$\frac{\partial f_i^{(h)}}{\partial c_i} = \frac{\partial f_i^{(h)}}{\partial B_y^{(h)}} \times \frac{\partial B_y^{(h)}}{\partial c_i} = \frac{I_{ux} - G_y^{(h)} e_i^{(h)} - \sum (G_y^{(h)} e_j^{(h)} - B_y^{(h)} f_i^{(h)})}{B_y^{(h)}} \times h\omega \quad (4-4)$$

i 节点谐波电压对 j 节点电容的灵敏度为:

$$\frac{\partial e_j^{(h)}}{\partial c_i} = \frac{f_j^{(h)}}{G_{ji}^{(h)}} \times h\omega \quad \frac{\partial f_j^{(h)}}{\partial c_j} = -\frac{f_j^{(h)}}{B_{ji}^{(h)}} \times h\omega \quad (4-5)$$

最后, 总的谐波电压有效值对补偿电容器的灵敏度通过下面的式子求取:

$$J_y = \frac{\partial V_i^{(h)}}{\partial c_j} = \frac{\partial V_i^{(h)}}{\partial e_i^{(h)}} \times \frac{\partial e_i^{(h)}}{\partial c_j} + \frac{\partial V_i^{(h)}}{\partial f_i^{(h)}} \times \frac{\partial f_i^{(h)}}{\partial c_j} \quad (4-6)$$

这样就可以形成一个灵敏度矩阵。

J_{ij} 为 i 节点谐波电压对 j 节点补偿电容器组的灵敏度, 当 $J_{ij} > 0$ 时, 说明随着 j 节点的电容器补偿容量的增加, i 节点的谐波电压也增大, 此时需要通过减少 j 节点的补偿容量来降低谐波电压。当 $J_{ij} < 0$ 时, 说明随着 j 节点的电容器容量的增加, i 节点的谐波电压减小, 此时, 如果谐波电压越限, 需要增加 j 节点的电容器容量来减小谐波电压越限。

4.2.2 灵敏度与遗传算法的结合

把灵敏度和遗传算法结合起来, 就是要在遗传算法的盲目寻优中, 加入灵敏度作为辅助信息, 使遗传算法的随机寻优变的有针对性, 从而相对较快、较高效的找到符合条件的最优解。要达到这样的效果, 需要在遗传算法的染色体基因中加入灵敏度的相关信息, 从而起到指导寻优的作用。下面通过一个简单的例子来说明这个思路。

假设有一个五节点的配电网, 在第 2、3、4 节点装设有补偿电容器组, 配电网受到了谐波污染, 需要对电容器进行重新优化。现在假定优化模型已经定好, 遗传算法的相关参数也选好, 种群规模取 50, 染色体长度为 15, 每个补偿点给 5 个基因的位置, 第 1 和第 5 节点没有进行补偿, 所以在染色体中也没有他们的位置。具体如下图所示:

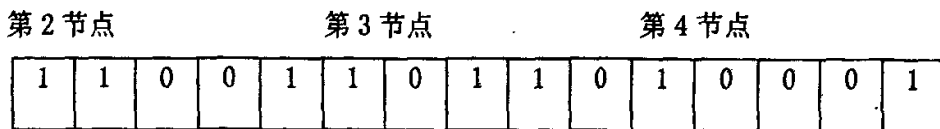


图 4-4 节点基因示意图

这个染色体就是一套电容器组合方案, 将每 5 位转化为相应的十进制可得到该节点

的补偿组数。如本例，2 节点补偿组数为 25，3 节点为 22，4 节点为 17。现在假设投入这套组合方案后，使 3 节点的 5 次谐波电压严重超过国家规定的标准。下面的工作是这样进行的：

先进行 5 次谐波潮流的计算，得出灵敏度矩阵 J ，假设如下所示：

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0 \\ 0.02 & 0.04 & 0 & 0 & 0.03 \\ 0 & -0.04 & 0.05 & 0.02 & 0 \\ 0 & 0 & -0.03 & 0.04 & 0.01 \\ 0 & -0.01 & 0 & 0 & 0.03 \end{bmatrix}$$

上面是各节点 5 次谐波电压对各补偿电容器组的灵敏度，由于前面提到 3 节点的 5 次谐波电压较为严重，我们现在就比较一下第 3 行中的各个元素的绝对值大小，很明显第三个最大，也就是说第三节节点本身的补偿电容器组对该节点的谐波电压影响最大，又由于它是正的，因此需要减少该节点的补偿电容器组数来降低该节点的谐波电压。我们知道第三节节点在染色体中的位置是第 6 位到第 10 位。具体基因为 10110，我们只需将这个二进制数减小就可以了。本文根据实际情况每次减 1 或加 1，但改变后不得超出基因编码的范围。比如 10110 转化为十进制是 22，减 1 就是 21，则对应的编码为 10101。基因按这样改变以后，如果这个染色体方案和其它没有改变的方案在竞争中相遇，就很有可能获胜而保留下来。如果这样的染色体在种群中是比较多的，最后必将导致整个种群有针对性的进化，从而较快地找到比较好的解。

4.3 基于遗传算法的配电网无功优化规划

4.3.1 基波的无功优化规划

要进行考虑谐波因素的配电网无功优化规划，需要先进行基波的无功优化。下面就本课题的基础工作基波的无功优化规划进行简要的介绍^[28-33]

首先给出基波优化规划的模型

$$\min J = \gamma I_c + O_c + \lambda F_v \quad (4-7)$$

式中：

$$O_c = \beta T_{\max} \Delta P$$

$$\Delta P = \sum_{(i,j) \in N_b} g_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij})$$

$$F_V = \sum_{i \in N_v} |V_i - K_i V_i|$$

约束条件

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}$$

$$Q_{ci} \leq Q_i$$

以上各式中参数意义如下： γ λ

F_V —是基波电压越限以后，将各节点电压减去电压约束值后的和函数， K_i 是约束系数；

N_v —是越限的基波电压的集合；

ΔP —线路网损；

Q_c —由网损得到的损耗费用；

I_c —补偿电容器总投资；

γ —投资回收系数；

λ —基波电压越限后的惩罚系数；

就这个模型采用遗传算法进行求解，具体流程图见图 4-5，步骤说明如下：

(1) 程序开始；

(2) 将配电网数据形成节点负荷数据库和支路阻抗数据库；

(3) 编制配电网潮流计算程序，并对该配电网进行计算分析；

(4) 设置遗传算法的种群规模、最大遗传代数、染色体长度、交叉概率、变异概率等同时给出关于种群规模和染色体内存记录的数组；

(5) 本文采用十进制整数的编码规则，染色体中的每一位整数代表该补偿节点所对应的补偿电容器组数；

(6) 调用随机函数 Rnd () 来给种群中的每一个染色体赋值；对所有的染色体都赋值后就形成了整个种群；

(7) 遗传算法开始运作：设最大遗传代数为 gen，则以后所有的遗传操作都在这个大

循环中进行;

(8)将染色体解码后,再将参数传递给基波潮流子程序 jbachlu() 进行潮流计算;

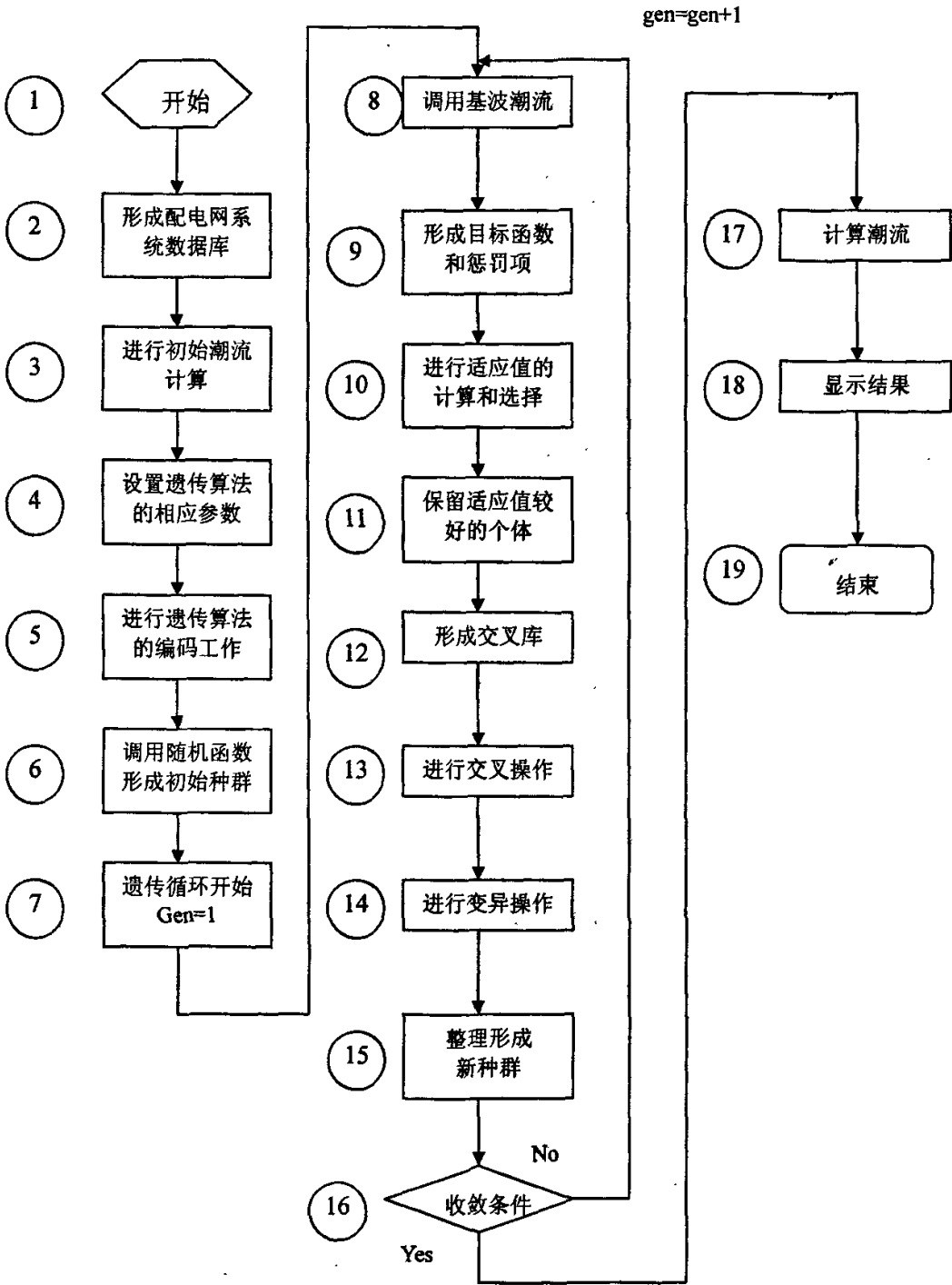


图 4-5 基波无功优化规划流程图

(9) 根据优化规划的模型形成目标函数并校验各个节点的电压是否合格, 不合格的给出惩罚;

(10) 进行适应值的选择工作, 通过本文给出的生存竞争的机制, 对群体中的染色体方案进行比较, 将适应值较大的染色体个体保留, 而适应值较小的淘汰掉, 相当于在原来的种群中选出好的个体形成一个新的种群;

(11) 采用最佳保留的机制, 在种群最好的个体中选出 5% 的个体, 这部分个体将不参与交叉和变异而直接进入下一代, 这是为了不使优秀的个体在随机交叉和变异中被改变而丢失掉;

(12) 将选出来的个体送入交叉库;

(13) 调用交叉子程序 `Cross()` 进行随机交叉操作, 这一步起到了扩大遗传算法搜索范围的作用, 通过交叉可能产生比以前所有个体都要好的个体;

(14) 进行随机变异操作, 这样作是为了更进一步扩大解的搜索范围, 避免陷入局部搜索的情况;

(15) 整理形成新的种群, 这就是遗传进化的第二代;

(16) 判断是否符合收敛标准, 本程序将最大遗传代数和最优个体持续保留代数相结合作为判断依据;

(17) 选出最好的个体以后, 对它再单独进行一次潮流计算, 得到相关的电压、网损等运行参数;

(18) 显示结果, 主要包括: 电压幅值、幅角、优化后的网损、各节点补偿情况、总的补偿容量、以及有无电压越限等;

(19) 结束

4.3.2 考虑谐波因素的无功优化规划

考虑谐波因素的配电网无功优化规划在算法上与基波的无功优化规划大致相同, 只是在遗传变异操作中加入了灵敏度进行辅助寻优, 在优化规划模型上充分考虑了谐波的影响, 并且程序中除了调用基波潮流之外还要调用谐波潮流, 所以运行时间也较基波优化规划长。由于优化规划模型已经在第二章中提到, 这里就不做介绍。考虑谐波因素的配电网无功优化规划和基波的无功优化规划在目标函数上不同, 在约束条件上多增加了

对谐波电压的约束，在算法上引入了灵敏度辅助寻优。其它部分基本没有大的变化。具体流程图见图 4-6，下面就流程图中与基波无功优化规划不同的部分加以说明：

流程图中[1]-[6]、[9]-[11]、[15]-[18]与基波无功优化规划相同，下面主要补充不同之处。

[7] 除了调用基波潮流之外，还须调用谐波潮流，计算出各次谐波电压以及总谐波畸变率，为后续工作做准备。

[8] 检验基波电压是否合格的同时，按照国家标准检验各次谐波电压和总谐波畸变率是否符合要求，不合要求的进行惩罚，根据前文提到的考虑谐波因素的配电网无功优化规划的模型建立目标函数。

[12] 在遗传算法中，交叉操作是比较重要的操作，经过该步骤后能够产生大量新个体，调用谐波潮流是为了找出不合格的个体，并指导其变异。

[13] 对于谐波电压越限的节点，计算其所对应的灵敏度矩阵，寻找到对该点影响最大的电容器的位置，并将该位置返回给遗传算法的主程序。

[14] 进行有针对性的变异后，形成了新的种群。

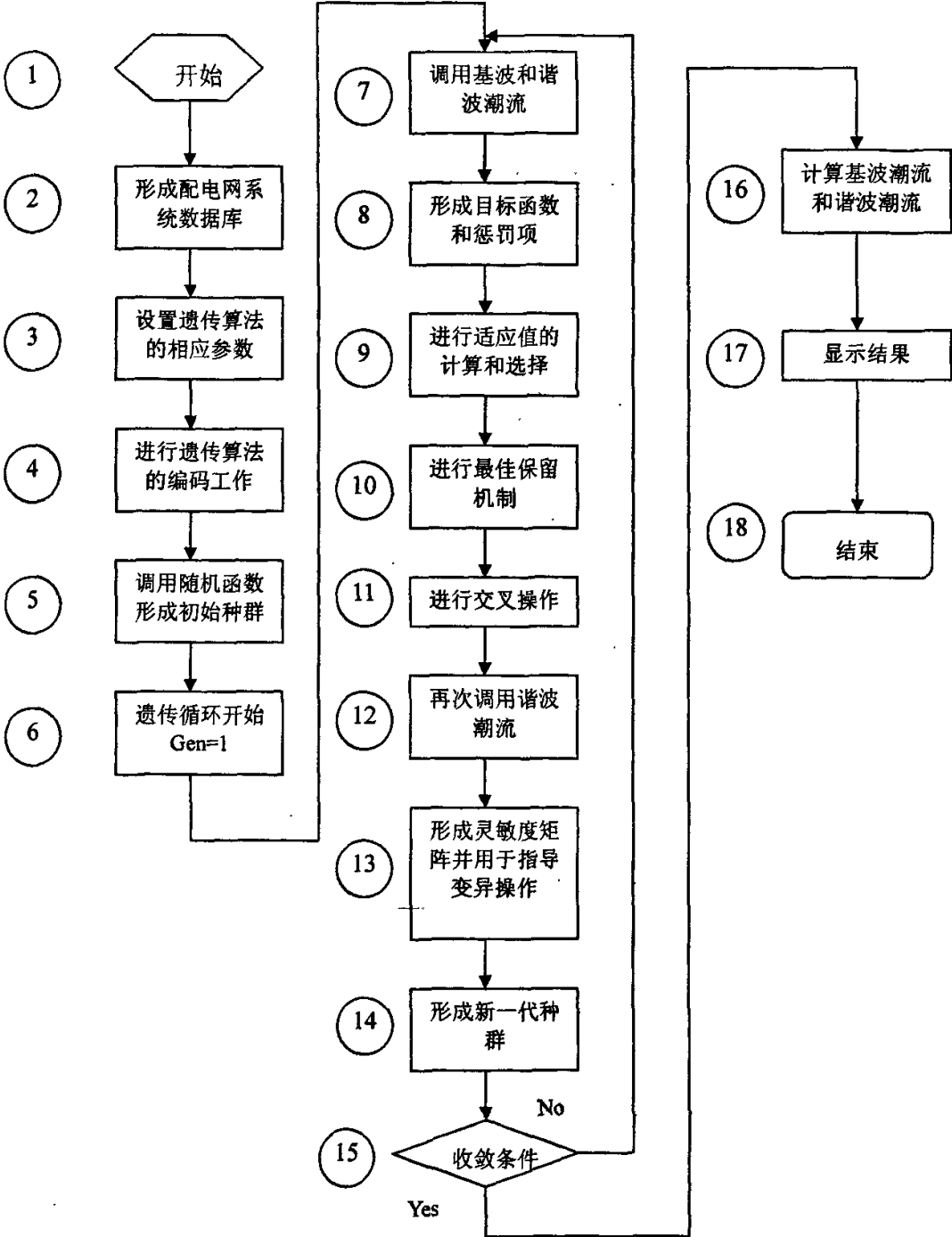


图 4-6 考虑谐波因素的配电网无功优化规划流程图

第五章 软件研制与算例分析

5.1 软件介绍

本文是基于遗传算法的在考虑谐波因素的情况下,进行的配电网无功优化规划。除此之外程序中还包括基波潮流计算、谐波潮流计算、以及基波无功优化等,是一个比较复杂的程序。程序的目的是在满足电网运行参数等约束条件下,来进行配电网无功功率的合理分布,实现投资少、电网电压合格率高、有功网损小的安全、经济运行目标。整个软件结构如图 5-1 所示,软件由四个大的部分组成,包括基波潮流计算、谐波潮流计算与谐波放大分析、基波无功优化规划、考虑谐波因素的无功优化规划。要进行考虑谐波的无功优化规划必须先完成上述项工作。

软件采用 Windows 编程界面的风格,有方便的数据输入窗口和明了的结果输出窗口,可以很方便地对结果进行分析和检验。数据的输入以及调用采用数据库的形式进行,数据的输出采用数据文件及文本框来实现。整个软件的研制采用 Visual Basic6.0 作为编程语言,具体的数据库采用 Access 的数据库形式,对数据库的连接以及访问采用 DAO 的方式进行。Visual Basic 是基于窗体的可视化应用程序开发平台,其编写程序的典型方法是根据预先设计的图形用户界面,用鼠标将工具箱中的各种控件拖放到窗体的指定位置,并将其调整成所需的大小,设置必要的属性,再加入应用程序代码。Visual Basic 的突出特点是将大量的 Windows 编程细节隐藏起来,通过数据驱动的方式调用不同的程序代码,使程序开发者可以将主要精力放在程序的关键处理步骤上,处理方法直观、简单。Visual Basic 虽然与传统的 Basic 语言有本质的不同,但保持了 Basic 语言简单、易用的优点。与 Visual Basic 5.0 相比,Visual Basic6.0 除包含了 Visual Basic5.0 的所有功能外,又增加了新的功能,如功能更强大的数据库访问技术、Internet 网络编程、Web 网页设计等。目前,Visual Basic6.0 几乎可以实现其它应用软件开发平台(如 Power Builder、Visual C++等)所能实现的所有功能,逐渐成为应用软件开发人员的首选方案。

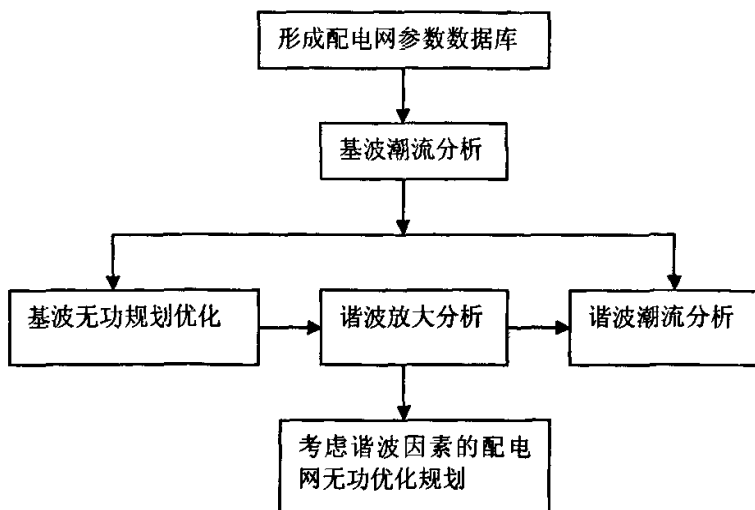


图 5-1 理论整体结构图

本文总的界面分为两大类型:输入界面和输出界面,整个软件的各大部分都有自己的数据输入与输出窗口,下面就几大部分具体的进行介绍:

本文编制了操作简便的界面,在进行基波潮流计算时,可以从界面上输入配电网的负荷、线路阻抗等相关参数,通过应用 VB6.0 中的数据访问技术 DAO,将输入界面中的数据形成数据库,具体包括节点负荷类的数据库和线路阻抗类的数据库。软件具有一定的通用性,可以对不同的配电网进行计算,只要从界面上输入配电网的网络参数及运行负荷等相关数据即可。软件中的基波潮流部分可以实现各节点电压和相角的计算,整个配电网网损的计算,线路流动功率的计算,还可以查看潮流计算当中的导纳矩阵等内部运算的结果。在数据输出界面中还设置了检验电压质量是否合格的有关选项,对数据的查看采用了带垂直滚动条的文本框,对节点电压等所有运行参数的查看一目了然。也可以输入具体的节点号来查寻某个节点的运行情况以及参数。

基波的无功优化规划和考虑谐波因素的无功优化规划,在界面设计方面大致相同,但程序代码和功能大不相同。基波的无功优化规划方面可以从界面中输入任何的节点进行无功优化,也可以输入所有的节点进行整个配电网的优化,灵活性较强,具体界面见图 5-2, 5-3,还可以根据需要选择遗传算法的种群规模、遗传代数、交叉概率、变异概率等遗传参数,还可以输入无功补偿节点的最大无功功率上限。输出界面中有优化后各节点电压,整个配电网网损,无功补偿总量以及各节点补偿情况等,还有可以检查补偿后电压质量是否合格的功能。考虑谐波因素的配电网无功优化规划内容更为复杂一些,除了有上述的基波无功优化规划的所有内容之外,还有查看各次谐波的功能以及检验谐

波电压是否符合国家标准的功能。而程序运行也要比基波的无功优化规划费时。

谐波潮流分析部分和基波潮流部分功能类似，只是要输出的对象是各次谐波电压以及电压总谐波畸变率。谐波放大分析部分给出了放大后的各次谐波电压以及是否符合国家标准的检验，其余的功能和基波潮流大致相同。

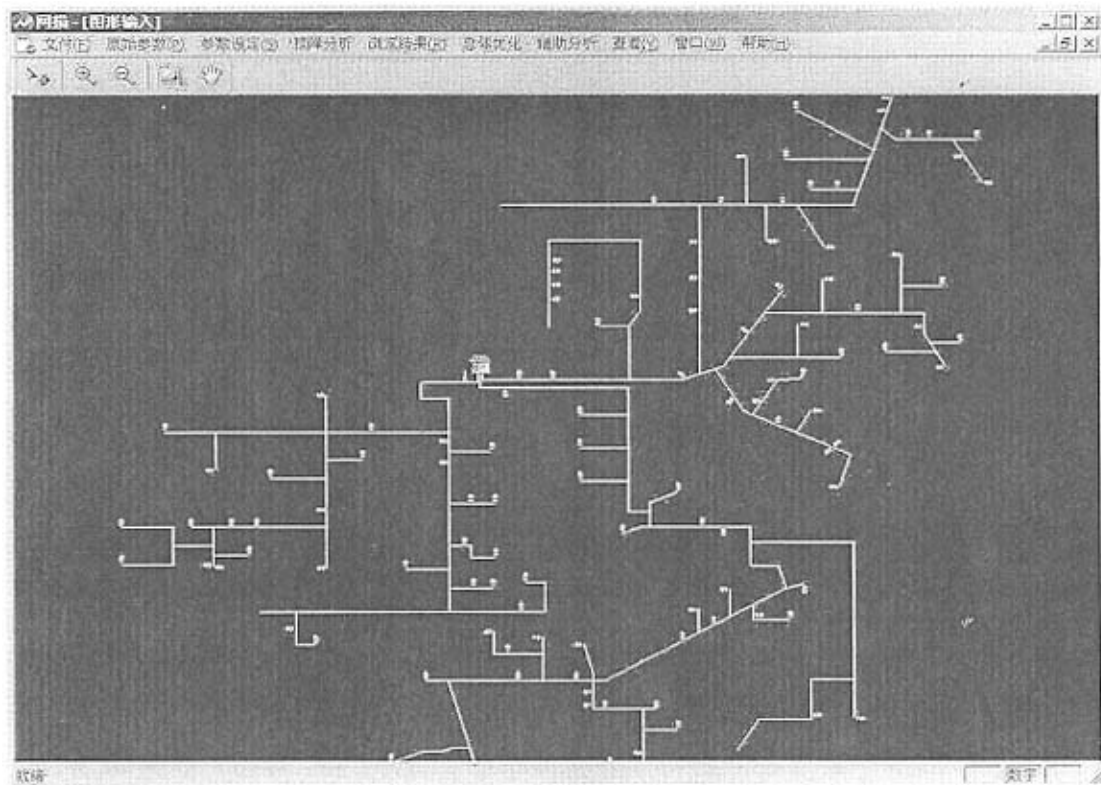


图 5-2 数据输入界面

目标设定:	
目标网络损耗率:	5.00 %
补偿点目标功率因数:	0.95
最低功率因数:	0.85
每套出缺无功补偿容量:	20
网络电压等级:	6千伏
母侧电压调整上下限:	正负不超过5 %

费用设定:	
无功装置单位费用:	50.00 元/kvar
变压器单位费用:	0.00 元/kV
导线单价:	0.00 元/m
每kVh电量价格:	0.50 元/kVh

Buttons: 确定 (OK), 取消 (Cancel)

图 5-3 系统参数设定界面

5.2 算例介绍

本文算例为胜利油田孤岛采油厂孤四管理区配网线路，该线路有 16 个节点，其单线图如图 5-4 所示。

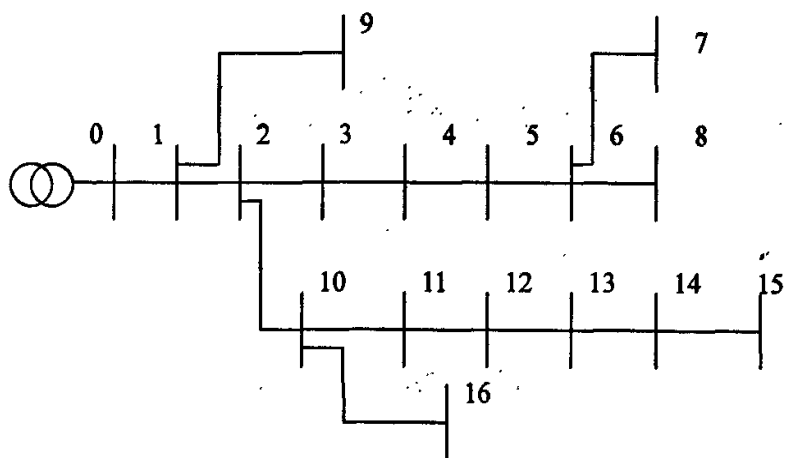


图 5-4 配电网结构示意图

配电网有关原始参数见表 5—1 和表 5—2。另外与进行无功优化规划相关的参数如下：

$k\%$ —投资回收率，取 10%；

β —单位电能损耗价格，取 0.5 元/kWh；

$t_{\max}$ —最大负荷小时数，取 3500h；

K_c —单位容量电容器价格，取 50 元/kVar。

表 5-1 支路导线型号和阻抗参数

支路 编号	始末 节点号	导线型号	支路长度 (米)	每千米电阻 (Ω)	每千米电抗 (Ω)
1	0-1	LJ-95	950	0.332	0.356
2	1-2	LJ-95	762	0.332	0.356
3	1-9	LJ-70	600	0.450	0.368
4	2-3	LJ-70	330	0.450	0.368
5	2-10	LJ-95	240	0.332	0.356
6	3-4	LJ-70	306	0.450	0.368
7	4-5	LJ-70	450	0.450	0.368
8	5-6	LJ-70	306	0.450	0.368
9	6-7	LJ-70	450	0.450	0.368
10	6-8	LJ-70	370	0.450	0.368
11	10-11	LJ-95	346	0.332	0.356
12	10-16	LJ-35	252	0.900	0.389
13	11-12	LJ-95	340	0.332	0.356
14	12-13	LJ-95	320	0.332	0.356
15	13-14	LJ-95	330	0.332	0.356
16	14-15	LJ-95	278	0.332	0.356

表 5-2 节点负荷参数

节点编号	有功负荷(kW)	无功负荷(kVar)	备注
1	200	160	
2	0	0	分支节点无负荷
3	100	40	
4	220	190	
5	70	30	
6	0	0	分支节点无负荷
7	210	170	
8	220	180	
9	490	390	
10	0	0	分支节点无负荷
11	40	30	
12	50	40	
13	470	370	
14	1600	1200	
15	70	50	
16	900	720	

图中所有的节点都是 PQ 节点，节点 0 为平衡节点。先对整个配电网进行潮流计算，然后根据前面提到的顺序依次进行基波的无功优化规划、谐波潮流分析、谐波放大分析

以及考虑谐波因素无功优化规划工作。本节主要介绍配电网的结构和相关参数。

在基波潮流计算中，基准容量 $S_B=1\text{MVA}$ ，基准电压 $U_B=6\text{kV}$ ，相关电压及网损情况见表 5-3。

表 5-3 基波潮流结果

节点	电压幅值	电压幅角	节点	电压幅值	电压幅角
1	0.97161	-0.26196	9	0.96936	-0.26372
2	0.98038	-0.45284	10	0.94732	-0.50082
3	0.95013	-0.45853	11	0.94233	-0.55250
4	0.94840	-0.46017	12	0.93752	-0.60288
5	0.94740	-0.46232	13	0.93309	-0.64982
6	0.94636	-0.46246	14	0.92954	-0.68895
7	0.94561	-0.46268	15	0.92942	-0.69048
8	0.94571	-0.46245	16	0.94442	-0.45274
网损	250.6973kW				

从表 5-3 中我们可以看到不少节点的电压标么值低于 0.95，而且配电网始端电压标么值为 1，而末端 15 节点低于 0.93，这样必然会造成大的网损，电网长期运行在这样的情况下，将会造成很大的经济损失，为提高电压质量，减少网损，有必要进行整个配电网的无功优化规划。

5.3 算例结果及分析

5.3.1 不考虑谐波的配电网无功优化规划

在对该配电网进行潮流分析之后，需要对算例进行基波的无功优化规划，以确定具体需要进行补偿的节点及补偿容量。具体的模型和程序流程图已经在第五章中详细介绍过。在进行优化规划时，如果补偿点太多，补偿容量太大，会花费太多的投资，如果补偿点太少则网损又降不下来。本文编制了通用性较强的程序，既可以从整个配电网出发寻找需要补偿的节点，也可以就具体节点进行补偿容量的确定。通过反复寻优，得出在 4，7，8，9，13，14，16 这七个节点进行补偿效果比较好，对于整个规划来讲对这些节点进行补偿是比较经济的。本文采用没有和灵敏度结合的遗传算法对算例进行了基波无功优化规划，具体取遗传算法的种群规模为 100，遗传代数为 60、交叉概率为 0.85、变异概率为 0.05，经过 120 秒的程序运行时间得到了较为满意的结果。具体如表 5-4、表 5-5

所示。

表 5-4 基波优化规划后的电压及网损

节点	电压幅值	电压幅角	节点	电压幅值	电压幅角
1	0.98038	-0.69948	9	0.97819	-0.70430
2	0.96799	-1.24711	10	0.96498	-1.39007
3	0.96654	-1.28814	11	0.96189	-1.53795
4	0.96521	-1.32275	12	0.95894	-1.68328
5	0.96450	-1.34490	13	0.95627	-1.81998
6	0.96380	-1.36868	14	0.95414	-1.93106
7	0.96329	-1.38514	15	0.95402	-1.93251
8	0.96338	-1.38393	16	0.96273	-1.42674
网损	158.228kW				

表 5-5 各节点补偿容量 (单位: kVar)

节点号	4	7	8	9	13	14	16
补偿容量	120	140	160	20	340	1180	640
总补偿量	2600						

我们看到经过优化规划后各节点的电压明显改善，而且整个配电网的网损大幅度地降了下来。然后进行经济比较，补偿前网损为 250.6973kW，按本文给出的最大负荷小时为 3500、电价 0.5 元/kWh) 进行计算，一年的运行损耗为 438720 元。进行优化规划后，网损降为 158.228kW，总投入电容器容量为 2600kVar，年运行费用为 406899 元。运行费用减少了 31821 元，这相当于减少了优化规划前运行费用的 8%，逐年累加，其经济价值是相当可观的。然而，这只是本文的基础工作，本文要解决的是当对配电网进行基波优化规划以后，这些电容器组将会对电网中已有的谐波产生放大作用，同时兼顾网损、谐波、以及经济性才是本文要解决的主要问题。

5.3.2 考虑谐波因素的配电网无功优化规划

在进行了基波潮流的计算和基波的无功优化规划后，再来分析该配电网的谐波潮流，谐波潮流是指在没有对配电网进行任何的补偿情况下的谐波潮流。具体的谐波源注入电流和计算结果见表 5-6 和表 5-7，该谐波潮流采用线性电流注入法来计算。

表 5-6 谐波源注入情况

注入节点	I_{3Re}	I_{3Im}	I_{5Re}	I_{5Im}	I_{7Re}	I_{7Im}	I_{11Re}	I_{11Im}
16	0.16	0.1	0.3	0.35	0.26	0.2	0.05	0

表 5-7 谐波潮流计算结果

节点	$HD_3(\%)$	$HD_5(\%)$	$HD_7(\%)$	$HD_{11}(\%)$	THD (%)
1	0.2042	0.7932	0.7737	0.1817	1.1413
2	0.3688	1.4356	1.3973	0.3281	2.0612
3	0.3679	1.4293	1.3941	0.3274	2.0565
4	0.3673	1.4267	1.3917	0.3268	2.0528
5	0.3669	1.4252	1.3902	0.3265	2.0506
6	0.3665	1.4237	1.3887	0.3261	2.0484
7	0.3662	1.4226	1.3887	0.3259	2.0469
8	0.3662	1.4228	1.3887	0.3259	2.0471
9	0.2037	0.7913	0.7719	0.1813	1.1386
10	0.4212	1.6363	1.5960	0.3747	2.3542
11	0.4188	1.6268	1.5867	0.3726	2.3406
12	0.4164	1.6176	1.5779	0.3705	2.3274
13	0.4142	1.6092	1.5697	0.3686	2.3154
14	0.4125	1.6024	1.5631	0.3671	2.3056
15	0.4124	1.6024	1.5629	0.3671	2.3053
16	0.5053	1.9340	1.8723	0.4364	2.7733

从表 5-7 中我们可以看到，虽然有各次谐波的存在，但不论是电压谐波总畸变率还是各次谐波电压都没有超过国家规定的标准。

其中 I_{3Re} ：代表 3 次谐波电压的实部， I_{3Im} 代表 3 次电压的虚部，其它几次谐波电压依次类推。

下面我们再看投入无功补偿电容器后，对整个配电网的谐波电压的影响，具体数据结果请见表 5-8。

表 5-8 谐波放大情况

节点	HD ₃ (%)	HD ₅ (%)	HD ₇ (%)	HD ₁₁ (%)	THD (%)
1	0.2405	1.3564	1.7742	0.0502	2.2468
2	0.4343	2.4480	3.1997	0.0909	4.0531
3	0.4352	2.4742	3.2767	0.0973	4.1301
4	0.4363	2.4994	3.3497	0.1034	4.2034
5	0.4369	2.5148	3.3947	0.1072	4.2486
6	0.4378	2.5335	3.4485	0.1118	4.3029
7	0.4384	2.5463	3.4855	0.1149	4.3402
8	0.4383	2.5457	3.4834	0.1147	4.3382
9	0.2400	1.3547	1.7739	0.0507	2.2455
10	0.4945	2.7733	3.5943	0.0991	4.5678
11	0.5001	2.9011	4.0063	0.1484	4.9738
12	0.5006	3.0286	4.4216	0.2100	5.3873
13	0.5108	3.1501	4.8199	0.2720	5.7870
14	0.5151	3.2486	5.1463	0.3247	6.1162
15	0.5108	3.2481	5.1455	0.3246	6.1153
16	0.5847	3.1403	3.8437	0.1172	4.9991

从表中我们可以看到。投入补偿电容器组以后对整个配电网的影响是比较复杂的，对 11 次谐波电压的作用基本上是抑制的，对其它次谐波电压总的来说是放大的。其中对 3 次、5 次谐波电压存在小幅度的放大，对 7 次谐波电压放大最为严重，放大倍数在 3 倍左右，已经超出了国家规定的 35kV 以下配电网，各奇次谐波电压不超过 3.2% 的标准。而且大多数节点的电压总谐波畸变率也超过了国标规定的不超过 4% 的标准。我们详细观察可以看出在补偿点分布比较密集的地方，放大情况最为严重。如 13, 14, 15 节点这一段支路，放大就比其它地方严重。如果电容器组经常工作在这样的环境下，会大大的减小其工作寿命。因此很有必要在进行无功优化规划的同时考虑谐波的污染情况。

下面我们对配电网进行本文的核心内容，考虑谐波因素的无功优化规划，优化规划的模型以及算法流程图在前面几章都已详细介绍。遗传算法的种群规模取 100，遗传代数取 80、交叉概率取 0.85、变异没有用传统的变异概率的方法，而是采用灵敏度来指导变异操作。经过多次反复运行，经过 300 秒就可以得到较好的结果，具体数据见表 5-9、表 5-10。

表 5-9 考虑谐波因素的无功优化规划结果

节点	HD ₃ (%)	HD ₅ (%)	HD ₇ (%)	HD ₁₁ (%)	THD (%)
1	0.2222	1.0200	1.3650	0.3608	1.7559
2	0.4000	1.8255	2.4210	0.6216	3.1209
3	0.4005	1.8392	2.4632	0.6530	3.1680
4	0.4011	1.8525	2.5033	0.6825	3.2133
5	0.4013	1.8594	2.5245	0.6985	3.2372
6	0.4017	1.8680	2.5501	0.7176	3.2663
7	0.4021	1.8759	2.5732	0.7347	3.2927
8	0.4018	1.8719	2.5621	0.7268	3.2799
9	0.2227	1.0312	1.3980	0.3844	1.7930
10	0.4557	2.0694	2.7238	0.6818	3.5177
11	0.4568	2.1063	2.8430	0.7844	3.6528
12	0.5791	2.1429	2.9611	0.8873	3.7890
13	0.4590	2.1778	3.0733	0.9855	3.9204
14	0.4593	2.1971	3.1398	1.0466	3.9990
15	0.4592	2.1968	3.1393	1.0464	3.9984
16	0.5417	2.3880	3.0442	0.6888	3.9671
网损	189.4746kW				

表 5-10 各节点的补偿情况 (单位: kVar)

节点号	4	7	8	9	13	14	16
补偿容量	120	120	80	240	300	440	200
总补偿量	1500						

从表中我们可以看到：与基波无功优化规划相比，考虑谐波因素的无功优化规划没有谐波超标现象，网损有所增加，补偿容量大幅度的减少，下面具体地比较一下这两种情况的经济性。

在本节前面部分已经得出基波无功优化规划的年运行费用为 438720 元，考虑谐波的配电网无功优化规划，网损比基波的无功优化规划增大了，但投资却减少了，总的年运行费用为 406581 元，虽然年运行费用比基波无功优化规划减少的不多，但是最为重要的是它减小了谐波的放大水平，有效的保护了电容器组，从而使整个配电网的安全性有所提高，这是很有意义的。

本文就考虑谐波因素的配电网无功优化规划问题，用没有灵敏度寻优的遗传算法进

行了求解，并且对同一模型和算例进行了多次计算，所取的遗传种群规模以及最大遗传代数与后来所改进的遗传算法是一样的，但并不能有效地兼顾网损与谐波电压。从表 5-11 中我们可以看到，寻优的结果是没有进行任何补偿，当然谐波电压也就没有放大的情况，网损也和初始运行时的情况一样。这显然不符合实际情况。这说明搜索到的是一个局部的解。也同时说明了该算法在处理这样的一个复杂的大型优化规划问题时，存在寻优针对性不强的缺点。因此需要通过灵敏度来指导其进行寻优。

表 5-11 传统遗传算法的优化结果

节点	基波电压	HD ₃ (%)	HD ₅ (%)	HD ₇ (%)	HD ₁₁ (%)	THD (%)
1	0.9803	0.2042	0.7932	0.7737	0.1817	1.1413
2	0.9522	0.3688	1.4326	1.3973	0.3281	2.0612
3	0.9501	0.3679	1.4293	1.3941	0.3274	2.0565
4	0.9484	0.3673	1.4627	1.3917	0.3268	2.0528
5	0.9474	0.3669	1.4252	1.3902	0.3265	2.0506
6	0.9463	0.3665	1.4237	1.3887	0.3261	2.0484
7	0.9456	0.3662	1.4226	1.3877	0.3259	2.0469
8	0.9457	0.3662	1.4228	1.3887	0.3259	2.0471
9	0.9693	0.2037	0.7913	0.7719	0.1813	1.1386
10	0.9473	0.4212	1.6363	1.5960	0.3747	2.3542
11	0.9423	0.4188	1.6268	1.5867	0.3726	2.3406
12	0.9375	0.4161	1.6176	1.5779	0.3705	2.3274
13	0.9330	0.4142	1.6092	1.5697	0.3686	2.3154
14	0.9295	0.4125	1.6024	1.5631	0.3671	2.3056
15	0.9294	0.4124	1.6021	1.5629	0.3671	2.3053
16	0.9444	0.5053	1.9340	1.8723	0.4364	2.7733

表 5-12 补偿情况及网损

节点号	4	7	8	9	13	14	16
补偿容量	0	0	0	0	0	0	0
网损	250.6973kW						

通过传统遗传算法与改进的遗传算法的比较，我们可以看到，就本模型而言，由于约束条件太多，如果用传统的遗传算法容易陷入局部解，而采用灵敏度进行改进以后，大大的增强了它的寻优针对性，从而有效地找到了相对较好的解。

第六章 结论与展望

本文针对孤四区配电网中存在的日益严重的谐波污染问题,以国家有关标准为依据,建立了考虑谐波因素的配电网无功优化规划的数学模型,该模型既考虑到了投入无功补偿电容器组对降低电网网损,改善电压质量的作用,也考虑到了投入电容器组对电网中已经存在的谐波会有放大作用。总结本文工作,取得如下成果和结论:

(1)根据配电网受谐波污染的实际情况,以国家标准的相关要求建立了考虑谐波因素的配电网无功优化规划数学模型,该模型既考虑了无功补偿的经济性,又考虑了抑制谐波的需要;

(2)把遗传算法用于配电网无功优化规划模型的求解,并根据谐波电压与补偿电容器之间的灵敏度关系,得出了用于指导遗传算法进行寻优的灵敏度矩阵,改进了遗传算法寻优的针对性,加快了寻优速度、提高了搜索精度;

(3)利用 Vb6.0 研制了考虑谐波因素的配电网无功优化规划软件,并对实际算例进行计算和结果分析,表明了本文无功优化规划模型的合理性和改进遗传算法的有效性。

配电网的无功优化并不是孤立的技术问题,而是一个各方面相互关联的问题。配电网无功优化的难点是模型的建立和优化方法的有效性,主要在如下几个方面进行探讨。

(1) 数学模型

迄今为止,国内外已有不少的配电网无功优化模型,它们各有所长,但还没有一个公认的完善的数学模型。事实上,配电系统无功优化涉及的问题较多,要建立一个无所不包的数学模型是不现实的。但无论什么样的优化模型,最终目的是配电网能安全、经济地运行。因此,建立恰当的优化模型为推广和应用配电网无功优化的首要解决的问题。

(2) 优化方法

配电网无功优化应属于运筹学的范畴,由于配电网无功优化涉及的变量较多,且有一部分是离散性的变量,因此用运筹学的算法无论在内存还是在计算量上都很大。另外,配电网无功优化模型的目标函数和约束条件是非线性的,并带有随机因素,更增加了处理问题的难度。因此,在进行优化时,结合各类方法的优缺点,不但要对方法进行深入改进研究,同时根据配电网的实际情况,对约束条件进行处理,对目标函数进行适当的简化。

(3) 实用性

在配电网进行无功优化控制时,要注意模型和优化方法的可行性、有效性;在对模

型的简化过程中，要注意简化过程的可行性和合理性；在应用优化方法时，要注意优化方法的有效性和实用性。

胜利油田的电网配置存在差别，新老系统并存以及地区经济条件的不同，对配电管理的需求不尽相同，因此采用功能化、模块化的设计方法，提高系统软件的开放性、移植性和可扩展性，可以根据用户的不同需求为用户定制所需的高级应用服务，是解决该问题的有效途径。随着电力系统自动化程度的提高、电力市场的推广和电网的复杂化，涉及到无功优化的领域逐渐增多，对于无功优化的需求都越来越迫切。

另外，由于配电网中电力半导体装置的大量应用，单纯考虑谐波影响下的配电网无功优化已不能满足配电网对谐波的标准要求，我们期待着更加完善的模型算法及优化控制方法的出现，以实现配电网谐波治理与无功补偿的综合优化。

参考文献

- [1] IEEE Working Group on Power Systems Harmonics. The effects of Power system harmonics on Power system equipment and loads [J]. IEEE Trans on power Apparatus and Systems, 1985, PAS-104: 2555~2563
- [2] Lemieux G, Power system harmonic resonance a documented case[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1990, 26(3):483~488
- [3] Dao Zhi-Xia "Harmonic Power Flow Studies" IEEE Trans, PAS-101, 1982
- [4] Qiu. J, Shahidepour. S. M. "A New Approach for Minimizing Power Losses and Improving Voltage Profile" IEEE Trans on Power Systems 1987, PWR-2(2):287~295
- [5] Ramalier. S etc. "New Technique for Optimal Control of Reactive Power Allocation for Loss Minimization in Power System". IEEE Proceedings, 1983, 130(4): 178~182
- [6] Kihole. A, Hill E. F. "Static Optimization of Reactive Power Source by Using of Sensitivity Parameters" IEEE Trans, 1971, PAS-90: 1166~1173
- [7] 骆济川, 张川. 电力系统优化运行. 武汉: 华中理工大学出版社出版, 1990年
- [8] 王锡凡. 电力系统优化规划. 北京: 水利电力出版社, 1990年
- [9] 陈国良, 王熙法, 庄镇泉等遗传算法及其应用. 北京: 人民邮电出版社出版, 1999年5月第二版
- [10] Lee K Y, Park Y M, Ortiz J. L. "A United Approach to Optimal Real and Reactive Power Dispatch" IEEE Trans. on PAS, 1985, 104(5): 1147~1157
- [11] 马晋强, "遗传算法在电力系统无功优化中的应用", 中国电机工程学报, 1995, 15(5), 347~353
- [12] 李珊君, 腾福生. 有谐电网无功优化的灵敏度分析法. 四川大学学报工程科版 2000, 3(2):81~84
- [13] GB/T 14593-93, 电能质量-公用电网谐波[S]. 国家技术监督局. 北京 1993, 403~410
- [14] 杨期余. 配电网. 北京: 中国电力出版社, 1998年, 40~42
- [15] 张学松, 柳焯, 于尔铿等. "配电网潮流算法比较研究". 电网技术, 1998, 22(4) 45~

- [16] 李林川,夏道止等. “电力系统电压和网损优化计算”. 全国高校电力系统及其自动化年会论文集:1994年, 221-225
- [17] 吴竞昌. 供电系统谐波. 中国电力出版社, 1998年5月第1版
- [18] 张一中, 宁远华. 电力系统谐波, 成都科技大学出版社, 1992年2月第1版 177~180
- [19] 顾洁, 程章潮. 基于遗传算法的无功优化模型研究. 电力系统及其自动化学报, 2001, vol113, No. 3:11~12[1]
- [20] Sachdeva.S. S. etc. “Optimal Network, VAR Planning by Nonlinear Programming”. IEEE Trans on PAS, 1973, Vol. PAS-92: 1212~1225
- [21] Hughes.Aetal. “Optimal Reactive Power Planning”. IEEE Trans, 1981, 100(5):2189~2196
- [22] 周双喜, 杨彬. “实现无功优化的新算法—遗传算法”. 电力系统自动化, 1995, 19(11):19~23
- [23] 周双喜, 杨彬. “影响遗传算法的因素及改进措施”, 电力系统自动化, 1996, 20(7): 24~26
- [24] 周双喜, 蔡虎. “应用于电力系统无功优化的改进遗传算法”, 电网技术, 1997, 21(12): 1~3
- [25] 文劲宇, 江振华, 姜霞等. “基于遗传算法的无功优化在鄂州电网中的实现”. 电力系统自动化, 2000, 24 (2): 45~47
- [26] 文劲宇, 刘沛, 程时杰. “遗传算法及其在电力系统中的应用”. 电力系统自动化, 1996, 20 (10): 5760, 20 (11): 60~65
- [27] 程浩忠, 廖培鸿. “地区电网补偿电容最优配置规划”. 电力系统自动化, 1987, 6: 3~11
- [28] 杨毅刚, 蒋毓新, 梁海. “电力系统无功最优补偿的研究”. 中国电机工程学报, 1984, 4 (2): 15~21
- [29] J Grefenstette. “Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithm”. IEEE Transactions on System, Man, Cybernetics, 1986, 16(1): 122~128
- [30] Fan Mingtian etc. “Discrete VAR Optimization New to Global Optimum by Genetic Algorithm”. 电网技术, 1995, 19 (5): 40~45
- [31] Kenji Iba” Optimal VAR Allocation by Genetic Algorithm” IEEE Proceeding 1993, IEEE ANNPS’ 93, pp163~168

- [32] K. Y. Lee et al. "An Optimization Technique for Reactive Power Planning of Sub-transmission Network under Normal Operation". IEEE Transactions on Power System, 1968, PWRS-1, pp153~159
- [33] Grainger J J, Civanlar S. "Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators". Part III: The Numerical Results. IEEE Trans PAS, 1985, 104(11): 3291~3297
- [34] 吕润余, 电力系统高次谐波, 北京: 中国电力出版社, 1998
- [35] 林海雪, 孙树勤, 电力网中的谐波, 北京: 中国电力出版社, 1998
- [36] 吴竟昌等, 电力系统谐波, 水利电力出版社, 1988
- [37] 谐波国家标准起草工作组, 电能质量公用电网谐波(国家标准)的编制, 中国电力, 1993(11): 2~7
- [38] 阿里拉加. J等著, 唐统一等译, 电力系统谐波, 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991
- [39] 曾为民, 邓勇刚, VisualBasic6.0高级实用教程, 北京: 电子工业出版社, 1999
- [40] 张直平, 李芬辰等, 城市电网谐波手册, 北京: 中国电力出版社, 2001
- [41] 油田供电公司, 油田电网背景谐波测试报告, 2005.07
- [42] 张直平等, 变频器对城网电能质量的影响, 供用电, 1990(3): 8~12
- [43] George J. Wkileh著. 徐政译 电力系统谐波—基本原理分析方法和滤波器设计机械工业出版社2003
- [44] V.E. Wagner. "Effectso fH armonicso nE quipment". IEEE Trans. 1993, 8(2): 672~680.
- [45] 郎维川 供电系统谐波的产生、危害及其防护对策 高电压技术2002. 6
- [46] 电压电流频率和电能质量国家标准应用手册. 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会编, 北京: 中国电力出版社. 2001
- [47] 林海雪. 电力系统中的间谐波问题供用电2001. 18 (3)
- [48] 杨洪耕, 肖先勇, 文吐俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(二)—供电网谐波的测量与分析 电力自动化设备2003. 11. 1~4
- [49] 李庚银, 徐春侠. 含牵引负荷的电力系统三相不对称谐波潮流计算. 电力系统自动化. 1999. 9: 26~30
- [50] 翁利民, 范克威. 电力网多谐波源谐波潮流计算程序的机理分析. 电力情报. 1999. 2
- [51] 王宾, 潘贞存. 电网谐波源与定位. 电能质量国际会议2002
- [52] J. Talacek, N.R. Watson. "Marginal Pricing of Harmonic Injections" IEEE

Trans. 2002, 17.

- [53] J. Arrillaga, A. Medina, M. L. V. Lisboa. "The Harmonic Domain. A Frame of Reference for Power System Harmonic Analysis", IEEE. Trans. 1995, 10(1): 433~440.
- [54] 王锡凡. 现代电力系统分析科学出版社. 2001: 13~16.
- [55] 龙禹. 同步电机谐波参数模型和谐波潮流计算. 中国电机工程学报 2000 2(4).
- [56] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会电压电流频率和电能质量国家标准应用手册. 中国电力出版社 2001.
- [57] 张一中, 宁元中, 宋永华等. 电力谐波. 成都科技大学出版社, 1992.
- [58] 潘云江, 赵书强, 陈斌发等. 电力系统不对称谐波潮流的一种实用计算方法[J]. 电力系统自动化, 2000 (9): 60~62.
- [59] 程浩忠, 廖培鸿. 电力系统谐波潮流的降维计算方法[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(1): 20~22.
- [60] 卢恩, 张步涵, 龚世纓等. 电力系统谐波潮流的一种解耦算法[J], 电网技术, 2003(2): 2~5.
- [61] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用. 北京: 国防工业出版社, 1999
- [62] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [63] Xia D, Heydt G T. Harmonic power flow studies Part I and Part II [J]. IEEE Trans PAS, 1982(6): 1257~1270.
- [64] George J. W. Power Systems Harmonics Fundamentals, Analysis and Filter Design. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2001.
- [65] BARAN ME, W. F. F. Optional Capacitor Placement Radial Distribution System [J]. IEEE Trans. On Power Delivery, 1989; 4(1).
- [66] Kenji Iba. Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm. IEEE Transactions on P.S. vol. 9, No. 2 May 1994.
- [67] Smith A, Tate D. Genetic Optimization Using a Penalty Function, Proceedings of 5th International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann Publishers, 1993, 499~503.
- [68] 许超, 郭伟. 电力系统无功优化的模型及算法综述. 电力系统及其自动化学报, 2003, Vol 15 (1): 100~104.

- [69] 陈蕊, 夏安邦, 马玉龙. 电力系统无功优化算法综述. 东北电力技术, 2006, 第6期:38~41.
- [70] 徐贤, 李群, 许扬等. 无功优化算法收敛性讨论. 电力自动化设备, 2005, Vol. 25 No. 2:89~93
- [71] 刘源祺. 地区电网无功优化规划方法综述. 山东电力技术, 2002年第3期: 21~23
- [72] 程亮, 苏义荣, 谢敏. 地县级电网全局电压无功优化的研究和软件开发. 江苏电机工程, Vol. 24 No. 1: 38~40
- [73] 韩静, 徐丽杰, 苏玲. 电力系统无功优化在线计算的算法研究. 电力科学与工程, 2005, No. 1:8~12
- [74] 范宏, 韦化. 改进遗传算法在无功优化中的应用. 电力系统及其自动化学报. 2005, Vol. 17 No. 1:6~9
- [75] 万盛斌, 陈明军. 基于改进遗传算法的电力系统无功优化. 西北水力发电. 2005, Vol. 21 No. 3:5~8
- [76] 杨素琴. 基于配电网经济运行的馈线无功优化补偿. 南京工程学院学报(自然科学版). 2004, Vol. 2 No. 4
- [77] 汪洪, 李建华. 基于遗传算法的电网无功优化运行. 河南电力. 2005年第4期:7~10
- [78] 顾洁, 陈章潮, 张林. 基于遗传算法的无功优化模型研究. 电力系统及其自动化学报. 2001, Vol. 13 No. 3
- [79] 刘方, 颜伟, David C. Yu. 基于遗传算法和内点法的无功优化混合策略. 中国电机工程学报. 2005, Vol. 25 No. 15:67~72
- [80] 宋丽群, 魏晓峰, 任水华等. 配电网多目标无功优化方法研究与应用. 南京工程学院学报(自然科学版). 2005, Vol. 3 No. 4
- [81] 杨瑞丽, 孙赛宇. 配电网无功优化规划软件包的研制与应用. 内蒙古电力技术. 2005, Vol. 23 No. 2:30~32

致谢

本文是在学校导师赵荣祥教授和企业导师施群高工的悉心指导下完成的，在此谨向导师表示衷心地感谢！

在研究生课程学习期间，以及在本文选题、资料收集、研究和写作整个过程中，得到了赵荣祥教授悉心指导和耐心帮助，导师求实治学和诲人不倦的精神值得我学习。与此同时，感谢评阅和阅读本文的各位专家为此付出的劳动。

在论文写作过程中，油田的有关同志提供了大量数据和资料，在此作者一并表示衷心感谢。

感谢我的妻子和家人，对我攻读研究生的理解和大力支持。